新工科系列基础教材

物联网导论

主　编　徐　辉　吕　菲

副主编　陈　林　陈　锋　程　航

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

VISIT…

内 容 简 介

本书既可以作为高等院校物联网相关专业学生的教材和参考书，也可以作为物联网技术相关研究人员、企事业单位相关专业人员进行物联网工作的重要参考资料。本书阐述了物联网的发展现状、关键技术及部分典型应用。全书共分 8 章。第 1 章阐述物联网的发展背景、定义、特征及关键技术。第 2 章介绍物联网传感器技术。第 3 章介绍自动识别技术。第 4 章从物联网感知功能出发，详细介绍传感器及 GPS 技术。第 5 章从物联网传输层出发，主要介绍支撑传输层的信息通信技术。第 6 章主要介绍物联网支撑及应用技术。第 7 章主要介绍物联网安全及相关技术。第 8 章主要介绍物联网技术典型应用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

物联网导论 / 徐辉，吕菲主编. —北京：电子工业出版社，2019.10
ISBN 978-7-121-36729-8

Ⅰ. ①物… Ⅱ. ①徐… ②吕… Ⅲ. ①互联网络－应用－教材②智能技术－应用－教材
Ⅳ. ①TP393.4②TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 111746 号

责任编辑：白 楠 特约编辑：王 纲
印 刷：
装 订：
出版发行：电子工业出版社
北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036
开 本：787×1 092 1/16 印张：14.25 字数：364.8 千字
版 次：2019 年 10 月第 1 版
印 次：2019 年 10 月第 1 次印刷
定 价：43.50 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254591，bain@phei.com.cn。

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

新工科系列基础教材编委会

主　任： 程志友

副主任： 王　勇　　李　锐　　李京文　　杨辉军　　章炳林　　黄存东

成　员：（按姓氏笔画排序）

王　勇　　安徽工商职业学院信息工程学院

朱正国　　安徽城市管理职业学院信息学院

朱晓彦　　安徽工业经济职业技术学院计算机与艺术学院

孙　虎　　北京新大陆时代教育科技有限公司华东区

李　锐　　安徽交通职业技术学院城市轨道交通与信息工程系

李如平　　安徽工商职业学院信息工程学院

李京文　　安徽职业技术学院信息工程学院

杨辉军　　安徽国际商务职业学院信息工程学院

何　鲲　　安徽经济管理学院信息工程系

张成叔　　安徽财贸职业学院云桂信息学院

陈开兵　　滁州职业技术学院信息工程学院

夏克付　　安徽电子信息职业技术学院软件学院

徐　辉　　安徽国际商务职业学院信息工程学院

黄存东　　安徽国防科技职业学院信息学院

章炳林　　合肥职业技术学院信息工程与传媒学院

程志友　　安徽大学互联网学院

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

经过前期的舆论宣传和技术准备，物联网正在向更理性、更实际和更扎实的应用方向发展，同时，物联网作为新兴战略产业的地位和作用备受世人关注。我国政府将物联网列入《国家中长期科学和技术发展规划（2006—2020 年）》，并发布了 2050 年国家产业路线图等，这都为促进物联网在我国的全面发展提供了有力的支持和保障。全国各地也纷纷出台了物联网产业发展规划与扶持政策，加大了对物联网发展和应用推广的力度。

科技发展，教育先行，推广普及物联网知识是当前的要务之一。麦肯锡咨询公司认为，物联网将在信息采集分析、自动化与控制两大领域中，在精确跟踪、环境动态感知、传感驱动型决策控制、流程精优、优化资源消耗与复杂自治系统等六个方面发挥革命性的作用。单从物联网的知识范畴与结构来看，涉及广泛而复杂的多学科领域，这也成为对物联网领域知识点进行综合性、交叉性、均衡性和全面性阐述的难点之一。

本书共分 8 章，主要包括物联网概述、传感器技术、自动识别技术、传感器网络技术、物联网通信技术、物联网支撑及应用技术、物联网安全和物联网应用等。

本书由徐辉、吕菲担任主编，由陈林、陈锋、程航担任副主编，王帮元、王谦、付学敏、孙虎、张书茂、陆慧、黄如兵、程晨等参与了编写。最后的统稿和校对由徐辉完成。全书由安徽国际商务职业学院杨辉军教授担任主审。

本书既可作为物联网工程、计算机、通信工程、电子信息相关专业的本科生和大专生物联网课程的入门教材，也可作为工程技术人员了解物联网整体概况和具体技术实现的参考用书。

编　　者

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

目　　录

第 1 章　物联网概述 …… （1）
1.1　物联网的定义 …… （1）
1.2　物联网系统的基本组成 …… （4）
1.2.1　物联网硬件平台组成 …… （4）
1.2.2　物联网软件平台组成 …… （5）
1.3　物联网的基本架构与关键技术 …… （7）
1.3.1　物联网的基本架构 …… （7）
1.3.2　物联网的关键技术 …… （9）
1.4　物联网的起源与发展 …… （13）
1.4.1　物联网概念的诞生 …… （13）
1.4.2　物联网在国外的发展 …… （14）
1.4.3　物联网在国内的发展 …… （15）
1.4.4　物联网进入 2.0 时代 …… （16）
1.5　互联网与物联网 …… （18）
1.5.1　互联网的概念 …… （18）
1.5.2　互联网与物联网的关系 …… （19）
1.5.3　H2H 与 T2T 的发展路线 …… （20）
思考与练习 …… （21）
第 2 章　传感器技术 …… （22）
2.1　传感器概述 …… （22）
2.1.1　传感器的概念 …… （22）
2.1.2　传感器的作用 …… （23）
2.1.3　传感器的分类 …… （23）
2.1.4　传感器的一般特性 …… （24）
2.1.5　传感器的技术特点 …… （28）
2.1.6　传感器的发展趋势 …… （29）
2.2　传感器的应用 …… （30）
2.2.1　应变式传感器 …… （31）
2.2.2　光电式传感器 …… （33）
2.2.3　超声波传感器 …… （37）
2.2.4　半导体传感器 …… （39）
2.2.5　生物传感器 …… （43）
2.2.6　传感器集成化、智能化和网络化 …… （44）
2.3　传感器选择的一般原则 …… （48）
思考与练习 …… （49）

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

第 3 章　自动识别技术 …… （50）
3.1　自动识别技术概述 …… （50）
3.2　生物识别技术 …… （51）
3.2.1　生物识别技术概述 …… （51）
3.2.2　生物识别技术的分类 …… （52）
3.2.3　生物识别系统 …… （56）
3.3　磁卡和 IC 卡识别技术 …… （57）
3.3.1　磁卡识别技术 …… （57）
3.3.2　IC 卡识别技术 …… （59）
3.4　光学字符识别技术 …… （61）
3.4.1　光学字符识别技术概述 …… （61）
3.4.2　光学字符识别过程 …… （62）
3.4.3　印刷汉字的光学字符识别 …… （63）
3.4.4　中文手写输入设备 …… （64）
3.5　条形码技术 …… （65）
3.5.1　条形码概述 …… （65）
3.5.2　条形码的识别原理 …… （67）
3.5.3　条形码的特点与功能 …… （69）
3.5.4　条形码的结构 …… （71）
3.6　射频识别技术 …… （77）
3.6.1　射频识别技术的概念与特点 …… （77）
3.6.2　射频识别技术的原理和分类 …… （79）
3.6.3　RFID 关键技术 …… （85）
思考与练习 …… （91）
第 4 章　传感器网络技术 …… （92）
4.1　无线传感器网络概述 …… （92）
4.1.1　无线传感器网络的系统结构和节点 …… （92）
4.1.2　无线传感器网络的结构和部署 …… （94）
4.1.3　无线传感器网络协议规范 …… （95）
4.2　IEEE 802.15.4 无线个人局域网技术 …… （97）
4.3　Bluetooth 技术 …… （98）
4.4　ZigBee 技术 …… （101）
4.5　Wi-Fi 技术 …… （107）
4.6　NFC 技术 …… （109）
4.7　红外通信技术 …… （111）
4.8　UWB …… （113）
4.9　定位技术 …… （115）
4.9.1　全球定位系统 …… （116）
4.9.2　蜂窝基站定位 …… （118）
4.9.3　AOA 定位 …… （119）

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

4.9.4 AGPS 定位 …… （120）
思考与练习 …… （121）
第 5 章 物联网通信技术 …… （122）
5.1 无线通信网络简述 …… （122）
5.2 移动通信技术 …… （125）
5.2.1 1G 移动通信 …… （125）
5.2.2 2G 移动通信 …… （125）
5.2.3 3G 移动通信 …… （126）
5.2.4 4G 移动通信 …… （128）
5.2.5 5G 移动通信 …… （130）
5.3 有线接入技术 …… （132）
5.3.1 基于双绞线传输的接入网 …… （132）
5.3.2 基于光传输的接入网 …… （133）
5.3.3 混合光纤/同轴接入网 …… （135）
5.4 光网络 …… （135）
5.4.1 光纤的发明 …… （136）
5.4.2 光网络的诞生及发展历程 …… （136）
5.4.3 光纤通信技术的发展现状 …… （139）
5.4.4 光网络的发展趋势 …… （140）
思考与练习 …… （142）
第 6 章 物联网支撑及应用技术 …… （143）
6.1 嵌入式技术 …… （143）
6.1.1 嵌入式系统简介及应用 …… （143）
6.1.2 嵌入式系统的结构 …… （144）
6.1.3 嵌入式系统的特点 …… （145）
6.1.4 嵌入式系统的体系结构 …… （145）
6.1.5 嵌入式处理器软件的特征 …… （145）
6.1.6 物联网给嵌入式系统带来机遇 …… （146）
6.2 物联网软件和中间件 …… （146）
6.2.1 中间件体系结构 …… （147）
6.2.2 中间件的分类 …… （147）
6.2.3 物联网中间件架构 …… （150）
6.3 数据库与数据挖掘技术 …… （150）
6.3.1 数据挖掘介绍 …… （151）
6.3.2 数据挖掘的实现和前景 …… （152）
6.4 数据处理与云计算 …… （153）
6.5 GIS 和 GPS 技术 …… （157）
6.5.1 GIS 系统介绍 …… （157）
6.5.2 GPS 系统介绍 …… （158）
6.6 微机电技术 …… （159）

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

思考与练习 …… （162）
第 7 章　物联网安全 …… （163）
7.1　物联网安全概述 …… （163）
7.1.1　物联网的安全技术分析 …… （164）
7.1.2　物联网面临的安全隐患 …… （165）
7.1.3　物联网安全的内容 …… （166）
7.1.4　两类密码体制 …… （166）
7.2　物联网安全体系 …… （169）
7.2.1　物联网的安全层次模型 …… （169）
7.2.2　物联网感知层安全 …… （170）
7.2.3　物联网网络层安全 …… （173）
7.2.4　物联网应用层安全 …… （174）
7.3　物联网与传感器的安全技术 …… （174）
7.3.1　无线传感器网络的安全需求 …… （174）
7.3.2　无线传感器网络面临的安全挑战 …… （176）
7.3.3　无线传感器网络可能受到的攻击和防御 …… （176）
7.4　物联网与 RFID 安全问题 …… （178）
7.4.1　RFID 系统的安全需求 …… （178）
7.4.2　RFID 面临的安全攻击 …… （179）
7.4.3　RFID 安全机制 …… （180）
思考与练习 …… （182）
第 8 章　物联网应用 …… （183）
8.1　智能家居 …… （183）
8.1.1　智能家居概念 …… （183）
8.1.2　智能家居的应用 …… （185）
8.2　智能物流 …… （190）
8.2.1　智能物流概述 …… （190）
8.2.2　智能物流的应用 …… （192）
8.3　智能电网 …… （196）
8.3.1　智能电网概述 …… （196）
8.3.2　智能电网的应用 …… （198）
8.4　智慧农业 …… （200）
8.4.1　智慧农业概述 …… （200）
8.4.2　智慧农业的应用 …… （201）
8.5　智慧交通 …… （204）
8.5.1　智慧交通概述 …… （204）
8.5.2　智慧交通的应用 …… （206）
8.6　智慧医疗 …… （207）
8.6.1　智慧医疗概述 …… （207）
8.6.2　智慧医疗的应用 …… （208）

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

8.7 智慧环保 ……（209）
8.7.1 智慧环保概述 ……（209）
8.7.2 智慧环保的应用……（210）
8.8 感知城市 ……（213）
8.8.1 感知城市概述 ……（213）
8.8.2 感知城市的应用……（214）

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

第1章

物联网概述

【学习要求】

（1）掌握物联网的相关概念。

（2）了解物联网的基本架构与关键技术。

（3）了解物联网的起源和发展。

（4）了解物联网的应用前景及互联网与物联网的关系。

1.1 物联网的定义

物联网是一个新的网络概念，至今并没有一个统一的定义，有人认为 RFID 的互联网就是物联网，有人认为传感器网络就是物联网，有人认为 M2M（Machine To Machine）就是物联网，有人认为把互联网的用户延伸和扩展到任何物品就是物联网。

国际通用的对物联网的定义：物联网是通过射频识别（RFID）、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备，按约定的协议，把任何物品与互联网连接起来，进行信息交换和通信，以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。

欧洲智能系统集成技术平台（EPoSS）发布的 *Internet of Things in 2020* 报告指出：物联网是由具有标识、虚拟个性的物体/对象所组成的网络，这些标识和个性等信息在智能空间使用智慧的接口与用户、社会和环境进行通信。其实质是将现有的计算机网络扩展到物品网络。

物联网的特征是对每一个物件都可以寻址，联网的每一个物件都可以控制，联网的每一个空间都可以通信。物联网是把过去很多区域化的专用网和互联网连接起来，使新一代增值业务在更广泛的网络平台上集合起来。物联网不是一个独立的网络，它是对现在的互联网进一步发展、泛在的一种形式。物联网概念模型如图 1-1 所示。

物联网中的“物”要满足以下条件才能够被纳入“物联网”的范畴：

（1）要有相应信息的接收器；

（2）要有数据传输通路；

（3）要有一定的存储功能；

（4）要有 CPU；

（5）要有操作系统；

（6）要有专门的应用程序；

（7）要有数据发送器；

（8）遵循物联网的通信协议；

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

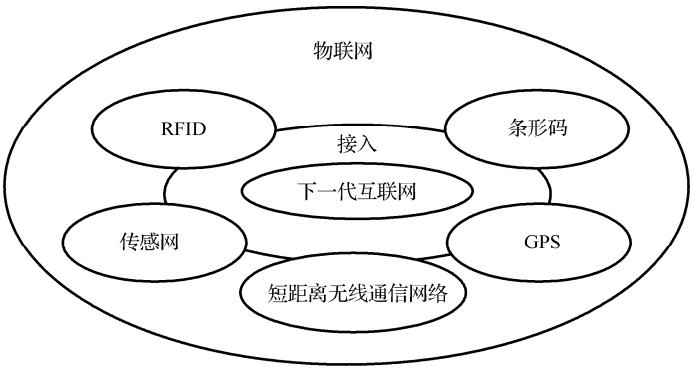


图 1-1　物联网概念模型

（9）在网络中有可被识别的唯一编号，即物联网中的“物”都具有标识、物理属性和实质上的个性，使用智能接口实现与信息网络的无缝整合。

总之，狭义上的物联网指连接物品与物品的网络，实现物品的智能化识别和管理；广义上的物联网则可以看成信息空间与物理空间的融合，将一切事物数字化、网络化，在物品之间、物品与人之间、人与现实环境之间实现高效信息交互方式，并通过新的服务模式使各种信息技术融入社会行为，是信息化在人类社会综合应用达到的更高境界。

目前，关于物联网有各种各样的说法，如无线传感器网络（WSN）、泛在网及 M2M 等。

传感器网络是以对物理世界的数据采集和信息处理为主要任务，以网络为信息传递载体，实现物与物、物与人之间的信息交互，提供信息服务的智能网络信息系统。

它包括传感节点、局域通信节点、互联网及用户界面等部分。其中，用户界面部分实现信息的聚合与呈现；互联网包括无线互联网和有线互联网，主要实现信息的传输；局域通信节点主要实现传感节点与互联网的通信；传感节点负责信息的采集。

无线传感器网络一般由局域网和广域网两部分组成，局域网通常采用近距离无线通信技术，如 ZigBee、Bluetooth、UWB 等，它通过各类集成化的微型传感器实时感知、监测和采集各种对象的信息，通过无线通信方式与广域网连接。广域网则利用现有的互联网资源，将信息传送到用户终端进行处理，从而实现物理世界、计算机世界及人类社会的三元世界连通。

如果将传感器的概念进一步扩展，把射频识别、二维码等信息的读取设备、音视频录入设备等数据采集设备都看作一种传感器，并提升到智能感知水平，则范围扩展后的传感器网络也可以被看作物联网。从 ITU—T、ISO/IEC JTC1 SC6 等国际标准化组织对传感器网络、物联网的定义和标准化范围来看，传感器网络与物联网是一个概念的两种不同表述，都是依托各种信息设备实现物理世界和信息世界的无缝融合。可见，可以认为“物联网”和“传感器网络”均是以智能传感器、RFID 等客观世界标识和感知技术，借助于无线通信技术、互联网、移动通信网络等实现人与物理世界的信息交互的网络。

泛在网（Ubiquitous Network），指无处不在的网络。ITU—T 2002 建议书中，将泛在网描述为，在服务预订的情况下，个人和/或设备无论何时、何地、何种方式都能以最少的技术限制接入服务和通信的网络。

它的基本特征是“无处不在、无所不能、无所不包”，即在任何时间、任何地点、任何人和物都能相互通信。ITU 认为，泛在网是将原本不属于电信范畴的技术纳入其中，从而构成一

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

个范围更大的网络体系。它包括三个层次：一是无所不在的基础网络，二是无所不在的终端单元，三是无所不在的网络应用。基础网络包括各种局域通信网络和各种广域通信网络。终端单元是泛在网的神经末梢，它们形式多样，接入方式、功能各异，可以是手机或手持终端，也可以是各种智能传感单元，它们完成信息的感知、传送，以及响应网络中心所发出的控制指令。从物物相连角度看，泛在网等同或包含物联网。

M2M 指机器与机器互联。从狭义上说，M2M 仅代表机器与机器之间的通信，广义来讲也包括人与机器的通信，是以机器智能交互为核心、网络化的应用与服务为前提的。目前，业界提到 M2M 时，更多是指非信息技术机器设备通过移动通信网络与其他设备或 IT 系统的通信。M2M 的业务不仅包含机器间的相互通信和控制，也包含机器响应相应人员的操作指令从而执行一定的操作和机器将采集的信息传送给相应人员。自 2002 年起，M2M 技术在世界各地得到快速推广，M2M 应用遍及电力、交通、工业控制、零售、公共事业管理、医疗、水利、石油等多个行业。欧洲电信标准化协会（ETSI）和第三代合作伙伴计划（3GPP）等国际标准化组织都启动了针对快速成长的 M2M 技术进行标准化的专项工作。

通过以上对现有各种网络概念的讨论可知，物联网是一种关于人与物、物与物广泛互联，实现人与客观世界进行信息交互的信息网络；传感器网络是利用传感器作为节点，以专门的无线通信协议实现物品之间连接的自组织网络；泛在网是面向泛在应用的各种异构网络的集合，强调网络之间的互联互通和数据融合/聚类与应用。互联网是指通过 TCP/IP 将异种计算机网络连接起来实现资源共享的网络技术，实现的是人与人之间的通信。M2M 是互联网在应用上的拓展，将传统的人与人之间的通信拓展至物和物、人和物之间的互联互通。

物联网与现有的其他网络（如传感器网络、互联网、泛在网及其他网络通信技术）之间的关系如图 1-2 所示。

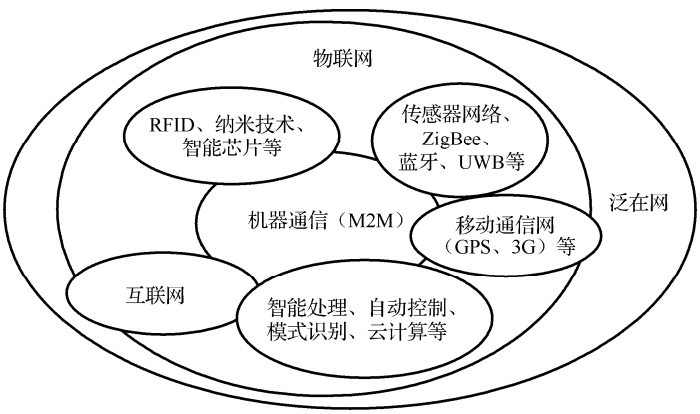


图 1-2 物联网与其他网络之间的关系

由图 1-2 可以看出物联网与其他网络及通信技术之间的包容、交互作用关系。物联网隶属于泛在网，但不等同于泛在网，它只是泛在网的一部分；物联网涵盖了物品之间通过感知设施连接起来的传感器网络，不论它是否接入互联网，都属于物联网的范畴；传感器网络可以不接入互联网，但当需要时，随时可利用各种接入网络接入互联网；互联网（包括下一代互联网）、移动通信网等可作为物联网的核心承载网。

虽然目前国内外对物联网没有一个统一的定义，但从本质上看，物联网是现代信息技术

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

发展到一定阶段后出现的一种聚合性应用与技术提升，将各种感知技术、现代网络技术和人工智能与自动化技术聚合与集成，使人与物智慧对话，创造一个智慧的世界。因为物联网技术的发展几乎涉及信息技术的方方面面，是一种聚合性、系统性的创新应用与发展，因此被称为信息产业的第三次革命性创新。

物联网的本质概括起来主要体现在三个方面：一是互联网特征，即对需要联网的“物”一定要能够实现互联互通；二是识别与通信特征，即纳入物联网的“物”一定要具备自动识别与物物通信（M2M）的功能；三是智能化特征，即网络系统应具有自动化、自我反馈与智能控制的特点。

综上所述，物联网并不是一个新的独立的网络，在过去互联网解决了人与人之间的交流联系的基础上，现在要将物与物联系起来，同时，人与物之间也要联系起来，实现人与人、人与物、物与物之间的互联。从某种意义上说，物联网就是互联网更广泛的应用，实现物理世界与数字世界的无缝连接。

1.2 物联网系统的基本组成

计算机互联网可以把世界上不同国家的人们通过计算机紧密地联系在一起，而采用感知识别技术的物联网也可以把世界上不同国家、地区的物品联系在一起，彼此之间可以互相“交流”数据信息，从而形成一个全球性物物相互联系的智能社会。

可以把物联网看成传统互联网的自然延伸，因为它的信息传输基础仍然是互联网。物联网是“万物沟通”的，具有全面感知、无缝互联、智能处理特征的连接物理世界的网络，可实现任何时间、任何地点及任何物体的连接。

从不同的角度看物联网会有多种类型，不同类型的物联网，其软硬件平台组成也会有所不同。

1.2.1 物联网硬件平台组成

物联网是以数据为中心的面向应用的网络，主要完成信息感知、数据处理、数据回传及决策支持等功能，其硬件平台可由传感器网络、核心承载网和信息服务系统等部分组成。物联网硬件平台组成示意图如图 1-3 所示。其中，传感器网络包括感知节点（数据采集、控制）和末梢网络（汇聚节点、接入网关等），核心承载网为物联网业务的基础通信网络，信息服务系统主要负责信息的处理和决策支持。

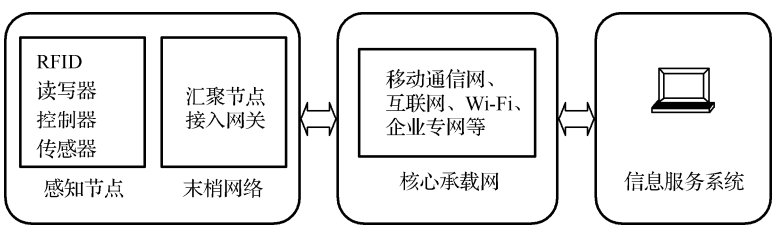


图 1-3　物联网硬件平台组成示意图

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

1. 感知节点

感知节点由各种类型的采集和控制模块组成，如温度传感器、声音传感器、振动传感器、压力传感器、RFID 读写器、二维码识读器等，完成物联网应用的数据采集和设备控制等功能。

感知节点的组成包括 4 个基本单元：传感单元（由传感器和模数转换功能模块组成，如 RFID、二维码识读设备、温感设备）、处理单元（由嵌入式系统构成，包括 CPU 微处理器、存储器、嵌入式操作系统等）、通信单元（由无线通信模块组成，实现末梢节点间以及它们与汇聚节点间的通信）及电源部分。感知节点综合了传感器技术、嵌入式计算技术、智能组网技术、无线通信技术及分布式信息处理技术等，能够通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息，通过嵌入式系统对信息进行处理，并通过随机自组织无线通信网络以多跳中继方式将所感知信息传送到接入层的汇聚节点和接入网关，最终到达信息应用服务系统。

2. 末梢网络

末梢网络即接入网络，包括汇聚节点、接入网关等，完成应用末梢感知节点的组网控制和数据汇聚，或完成向感知节点发送数据等功能。也就是在感知节点之间组网之后，如果感知节点需要上传数据，则将数据发送给汇聚节点（基站），汇聚节点收到数据后，通过接入网关完成和承载网络的连接；当用户应用系统需要下发控制信息时，接入网关接收到承载网络的数据后，由汇聚节点将数据发送给感知节点，完成感知节点与承载网络之间的数据转发和交互功能。

感知节点与末梢网络承担物联网的信息采集和控制任务，构成传感器网络，实现传感器网络的功能。

3. 核心承载网

核心承载网可以有很多种，主要承担接入网与信息服务系统之间的数据通信任务。根据具体应用需要，承载网可以是公共通信网，如 3G、4G、5G 移动通信网，Wi-Fi，WiMAX，互联网，企业专用网，新建的专用于物联网的通信网。

4. 信息服务系统硬件设施

物联网信息服务系统硬件设施由各种应用服务器（包括数据库服务器）组成，还包括用户设备（如 PC、手机）、客户端等，主要用于对采集数据的融合/汇聚、转换、分析，以及对用户呈现的适配和事件的触发等。对于信息采集，由于从感知节点获取的是大量的原始数据，这些原始数据对于用户来说只有经过转换、筛选、分析处理后才有实际价值。对这些有实际价值的信息，由服务器根据用户端设备进行信息呈现的适配，并根据用户的设置触发相关的通知信息；当需要对末端节点进行控制时，信息服务系统硬件设施生成控制指令并发送，以进行控制。针对不同的应用将设置不同的应用服务器。

1.2.2 物联网软件平台组成

软件平台是物联网的神经系统。不同类型的物联网，其用途是不同的，其软件平台也不

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

相同，但软件平台的实现技术与硬件平台密切相关。相对于硬件平台而言，软件平台的开发及实现更具有特色。一般来说，物联网软件平台建立在分层的通信协议体系之上，通常包括数据感知系统软件、中间件系统软件、网络操作系统（包括嵌入式系统），以及物联网管理信息系统（Management Information System，MIS）等。

1. 数据感知系统软件

数据感知系统软件主要完成物品的识别。存储有 EPC 码的电子标签在经过读写器的感应区域时，物品 EPC 码会自动被读写器捕获，从而实现 EPC 信息采集的自动化，所采集的数据交由上位机信息采集软件进行进一步处理，如数据校对、数据过滤、数据完整性检查等，这些经过整理的数据可以被物联网中间件、应用管理系统使用。对于物品电子标签，国际上多采用 EPC 标签，用 PML 语言来标记每一个实体和物品。

2. 中间件系统软件

中间件是位于数据感知设施（读写器）与后台应用软件之间的一种应用系统软件。中间件具有两个关键特征：一是为系统应用提供平台服务，这是基本条件；二是需要连接到网络操作系统，并且保持运行状态。中间件为物联网应用提供一系列计算和数据处理功能，主要任务是对感知系统采集的数据进行捕获、过滤、汇聚、计算，完成数据校对、解调、数据传送、数据存储和任务管理，减少从感知系统向应用系统中心传送的数据量。同时，中间件还可提供与其他 RFID 支撑软件系统进行互操作等功能。引入中间件使得原先后台应用软件系统与读写器之间非标准、非开放的通信接口，变成了后台应用软件系统与中间件之间、读写器与中间件之间的标准、开放的通信接口。

一般来说，物联网中间件系统包含读写器接口、事件管理器、应用程序接口、目标信息服务和对象名解析服务等功能模块。

（1）读写器接口。物联网中间件必须优先为各种形式的读写器提供集成功能。协议处理器确保中间件能够通过各种网络通信方案连接到 RFID 读写器。RFID 读写器与其应用程序采用普通接口，大多采用由 EPCglobal 组织制定的标准。

（2）事件管理器。事件管理器用来对读写器接口的 RFID 数据进行过滤、汇聚和排序操作，并通告数据与外部系统相关联的内容。

（3）应用程序接口。应用程序接口是应用程序系统控制读写器的一种接口；此外，要求中间件能够支持各种标准的协议（例如，支持 RFID 及配套设备的信息交互和管理），同时还要屏蔽前端的复杂性，尤其是前端硬件（如 RFID 读写器等）的复杂性。

（4）目标信息服务。目标信息服务由两部分组成：一部分是目标存储库，用于存储与标签物品有关的信息并使之能用于以后查询；另一部分是目标存储库管理的信息接口的服务引擎。

（5）对象名解析服务。对象名解析服务（ONS）是一种目录服务，主要是将对每个带标签物品所分配的唯一编码，与一个或多个拥有关于物品更多信息的目标信息服务的网络定位地址进行匹配。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

3. 网络操作系统

物联网通过互联网实现物理世界中的任何物品的互联，在任何地方、任何时间可识别任何物品，使物品成为附有动态信息的“智能产品”，并使物品信息流和物流完全同步，从而为物品信息共享提供一个高效、快捷的网络通信及云计算平台。

4. 物联网管理信息系统

物联网也要管理，类似于互联网的网络管理。目前，物联网大多采用基于 SNMP 建设的管理系统，这与一般的网络管理类似，提供对象名解析服务。ONS 类似于互联网的 DNS，要有授权，并且有一定的组成架构。它能把每一种物品的编码进行解析，再通过 URL 服务获得相关物品的进一步信息。

物联网管理信息系统包括企业物联网信息管理中心、国家物联网信息管理中心及国际物联网信息管理中心。企业物联网信息管理中心负责管理本地物联网，它是最基本的物联网信息服务管理中心，为本地用户单位提供管理、规划及解析服务。国家物联网信息管理中心负责制定和发布国家总体标准，负责与国际物联网互联，并且对企业物联网信息管理中心进行管理。国际物联网信息管理中心负责制定和发布国际框架性物联网标准，负责与各个国家的物联网互联，并且对各个国家物联网信息管理中心进行协调、指导、管理等工作。

1.3 物联网的基本架构与关键技术

1.3.1 物联网的基本架构

物联网作为新兴的信息网络技术，将会对 IT 产业发展起到巨大的推动作用。业界公认，物联网有三个层次，底层是用来感知数据的感知层，中间层是数据传输的网络层，最上层则是应用层。图 1-4 是物联网连接示意图。

1. 感知层

感知层顾名思义就是感知系统的一个层面，这里的感知主要就是指系统信息的采集。感知层完成把所有物品信息通过条形码、射频识别、传感器、红外感应器传输到互联网前的准备工作。

感知层由各种传感器及传感器网关构成，包括二氧化碳浓度传感器、温度传感器、湿度传感器、二维码标签、RFID 标签和读写器、摄像头、全球定位系统等感知终端。感知层的作用相当于人的眼、耳、鼻、喉和皮肤等神经末梢，其主要功能是识别物体、采集信息，包括各类物理量、标识、音频、视频数据，并传送到上位端。

感知层是实现物联网全面感知的核心技术，感知节点随时感知、测量、捕获和传递信息，汇聚节点汇聚、分析、处理和传送数据。

目前感知层的智能化程度不高，仅能实现数据的采集与传输，但未来一定会向着智能化方向发展，比如机场反侵入系统，原来只能看物体是否靠近，将来要知道这个物体是什么，它靠近的方向、企图、速度等信息。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

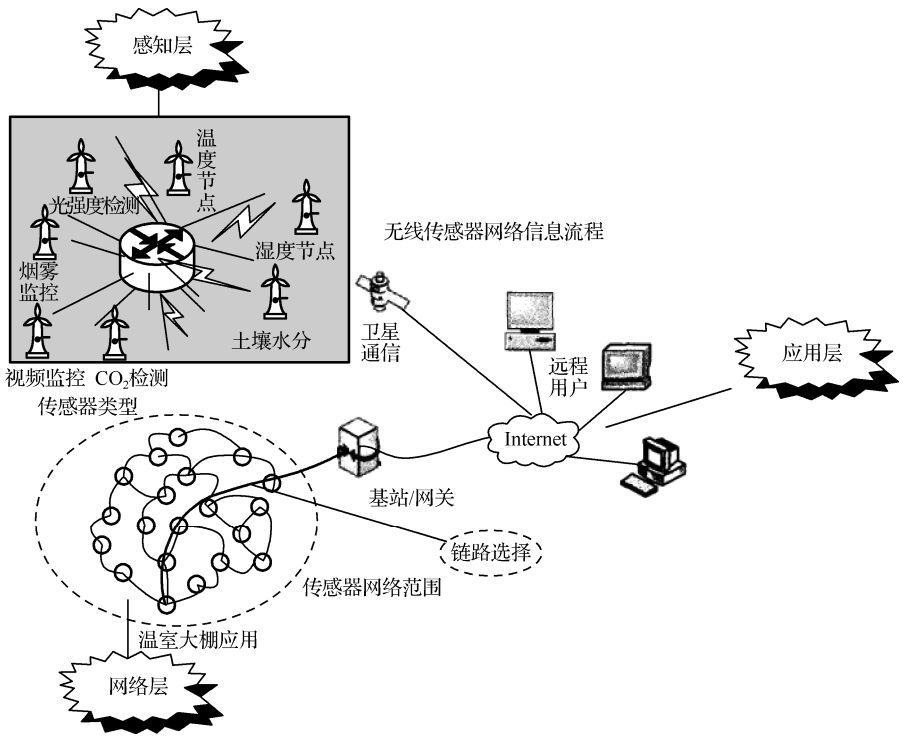


图 1-4　物联网连接示意图

2. 网络层

物联网的网络层可以理解为搭建物联网的网络平台，它由各种私有网络、互联网、有线和无线通信网、网络管理系统和云计算平台等组成，相当于人的神经中枢和大脑，负责传递和处理感知层获取的信息，实现更加广泛的互联功能，能够把感知到的信息无障碍、高可靠性、高安全性地进行传送，这需要新兴的传感器网络与移动通信技术、互联网技术相融合。

网络层所需要的关健技术包括长距离有线和无线通信技术、网络技术等。网络层为建立网络连接和上层提供服务，具备以下主要功能：路由选择和中继；激活、终止网络连接；在一条数据链路上复用多条网络连接，多采用时分复用技术；差错检测与恢复；排序、流量控制；服务选择；网络管理；信息存储与查询等。

经过十余年的快速发展，移动通信、互联网等技术已比较成熟，基本能够满足物联网数据传输的需要。

3. 应用层

应用层是物联网和用户（包括人、组织和其他系统）的接口，主要利用经过分析处理的感知数据，为用户提供丰富的应用，将物联网技术与个人、家庭和行业信息化需求相结合，实现广泛智能化应用解决方案。应用层包含应用支撑子层和应用服务子层，应用支撑子层用于支撑跨行业、跨应用、跨系统的信息协同、共享、互通的功能。应用服务子层包括智能交通、智能医疗、智能家居、智能物流、智能电力、绿色农业、工业监控、公共安全、城市管

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

理、环境监测等行业应用。目前，某些行业已经积累了一些成功的案例。

图 1-5 是物联网基本架构。

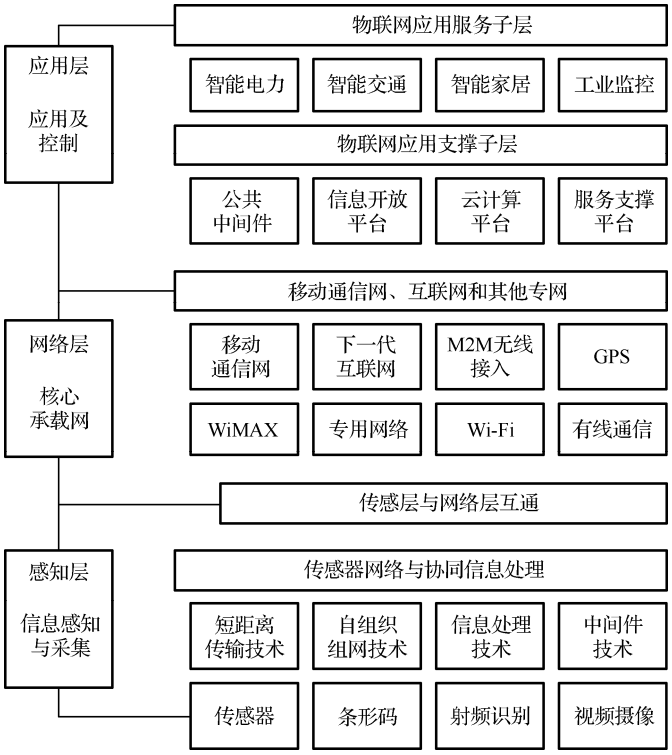


图 1-5 物联网基本构架

1.3.2 物联网的关键技术

物联网已成为目前 IT 业界的新兴领域，引发了相当热烈的研究和探讨。不同的视角对物联网概念的看法不同，所涉及的关键技术也不相同。可以确定的是，物联网技术涵盖了从信息获取、传输、存储、处理直至应用的全过程，在材料、器件、软件、网络、系统各个方面都要有所创新才能促进其发展。

国际电信联盟报告提出，物联网主要需要 4 项关键性应用技术：

① 标识物品的 RFID 技术；

② 感知事物的传感器网络技术（Sensor Technologies）；

③ 思考事物的智能技术（Smart Technologies）；

④ 微缩事物的纳米技术（Nanotechnology）。

欧盟《物联网研究路线图》将物联网研究划分为 10 个层面：

① 感知（ID 发布机制与识别）；

② 物联网宏观架构；

③ 通信（OSI 参考模型的物理层与数据链路层）；

④ 组网（OSI 参考模型的网络层）；

⑤ 软件平台、中间件（OSI 参考模型的网络层以上各层）；

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

⑥ 硬件；
⑦ 情报提炼；
⑧ 搜索引擎；
⑨ 能源管理；
⑩ 安全。

通过对物联网内涵的分析，可以将实现物联网的关键技术归纳为感知技术、网络通信技术（主要为传感器技术和无线网络技术）、数据融合与智能技术（主要是人工智能技术）、云计算技术等。

1. 感知技术

感知技术可理解成在物联网中让物品“开口说话”的关键技术。物联网中，RFID 技术是一种非接触式的自动识别对象并获取相关数据的技术。识别过程无须人工干预，可工作于各种恶劣环境。RFID 技术可识别高速运动物体并可同时识别多个标签，操作快捷方便。RFID 标签上存储着规范而具有互用性的信息，通过无线数据通信网络把它们自动采集到中央信息系统，实现全球范围内的物品跟踪与信息共享。

典型的 RFID 系统一般由 RFID 电子标签、读写器和信息处理系统组成。当带有电子标签的物品通过特定的信息读写器时，标签被读写器激活并通过无线电波将标签中携带的信息传送到读写器和信息处理系统，完成信息的自动采集工作。信息处理系统则根据需求承担相应的信息处理和控制工作。

物品编码是物品在信息网络中的身份标识。没有物品编码，网络中就没有“物”，因此，物品编码是物联网的基础。

物品编码体系的建立必须以物品编码标准化为前提，编码技术是描述数据特性的信息技术，为标识物品提供技术保障。标识技术是根据物品的特性来描述设备，它是编码的物理实现，比如，设备的编码和标识、信息的编码和标识等。编码的目的就是识别物品的特性，也就是说，人们为了能够分清不同的物品及其特性，需要赋予物品唯一的编码，同时要求各部门采用同样的编码规则，这样做是为了使大多数物品有统一的编码规则，从而使物品的编码有唯一性。为了能够识别物品，编码的唯一性是非常重要的。

标识技术是指通过不同的载体去表现物品信息，即用什么方式将信息写入设备。我们通常所说的物品信息的载体主要有条形码、射频识别标签等。标识存在于人们的生活中，当然在物联网中也存在标识，通过对物品进行标识能够使人们清楚物品的各种信息。这一点对于信息的采集是非常重要的，如果没有对物品进行标识，就没有办法对物品信息进行采集，这样使得在物联网末端的信息采集没有办法进行，那物联网“物物相连”的最终目标就没有办法达成。

2. 传感器技术

传感器技术是从自然信源获取信息，并对其进行处理、变换和识别的一门多学科交叉的现代科学与工程技术，它涉及传感器、信息处理和识别的规划设计、开发、制造、测试、应用及评价改进等活动。

在物联网中，传感器技术主要负责接收物品“讲话”的内容。传感器负责物联网信息的

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

采集，是实现对现实世界感知的基础，是物联网服务和应用的基础。

传感器种类繁多，原理也多种多样。根据被测量的性质，可分为物理传感器、化学传感器和生物传感器三大类，还可按用途、材料、输出信号类型、制造工艺等方式进行分类。随着技术的不断进步，传感器的类型不断增加，传感器的应用范围不断扩大，涉及工业生产自动化、国防现代化、航空航天、能源、环境保护、生物科学等领域。随着纳米技术和微机电系统技术的应用，传感器的尺寸减小、精度提高，大大拓展了其应用范围。

物联网中的传感器节点通常由数据采集模块、数据处理模块、数据传输模块和电源构成。节点具有感知能力、计算能力和通信能力，也就是在传统传感器基础上，增加了协同、计算、通信功能。近年来，随着生物科学、信息科学和材料科学的发展，传感器技术有向微型化、多功能化、智能化和网络化方向发展的趋势。

一个典型的传感器网络通常由传感器节点、接收发送器、Internet 或通信卫星、任务管理节点等部分构成。传感器节点散布在指定的感知区域内，实时感知、采集和处理网络覆盖区域中的信息，并通过“多跳”网络把数据传送至接收发送器，接收发送器也可以用同样的方式将信息发送给各节点。接收发送器直接与 Internet 或通信卫星相连，通过 Internet 或通信卫星实现任务管理节点与传感器之间的通信。在出现节点损坏、失效等问题的情况下，系统能够自动调整，从而确保整个系统的正常通信。

3. 无线网络技术

物联网中，物品与人的无障碍交流，必然离不开高速、可进行大量数据传输的无线网络。无线网络既包括允许用户建立远距离无线连接的全球语音和数据网络，也包括为近距离通信所提供的蓝牙技术和红外技术。

在近距离通信方面，以 IEEE 802.15.4 为代表的近距离通信技术是目前的主流技术，802.15.4 规范是 IEEE 制定的关于低速近距离通信的物理层和媒体介入控制层规范，工作在工业科学医疗频段，免许可证的 2.4GHz ISM 频段全世界都可通用。在广域网络通信方面，IP 互联网、4G/5G 移动通信、卫星通信技术等实现了信息的远程传输，特别是以 IPv6 为核心的下一代互联网的发展，将为每个传感器分配 IP 地址，也为传感器网络的发展创造了良好的条件。传感器网络相关通信技术常见的有蓝牙、IrDA、Wi-Fi、ZigBee、RFID、UWB、NFC、WirelessHart 等。

4. 人工智能技术

人工智能是研究使计算机模拟人的某些思维过程和智能行为（如学习、推理、思考、规划等）的技术。在物联网中，人工智能技术主要负责对物品“讲话”的内容进行分析，从而实现计算机自动处理。

5. 云计算技术

现有网络主要还是起着信息通道的作用，对信息本身的分析、处理并不多，目前各种专业应用系统的后台数据处理也是比较单一的。物联网中的信息种类、数量都将成倍增加，其需要分析的数据量呈指数级增加，同时还涉及多个系统工程之间的各种信息数据的融合问题，以及如何从海量数据中挖掘信息等，这些问题给数据计算带来了巨大的挑战。

物联网的发展离不开云计算技术的支持。物联网中的终端的计算和存储能力有限，云计

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

算平台可以作为物联网的“大脑”，实现对海量数据的存储、计算。

从服务角度看，云计算是一种全新的网络服务模式，将传统的以桌面为核心的任务处理转变为以网络为核心的任务处理，利用互联网实现想完成的一切处理任务，使网络成为传递服务、计算力和信息的综合媒介，真正实现按需计算、网络协作。

从技术角度看，云计算是对并行计算（Parallel Computing）、分布式计算（Distributed Computing）和网格计算（Grid Computing）的发展或商业实现。

云计算是一个美好的网络应用模式，由 Google 首先提出。云计算最基本的概念是通过网络将庞大的计算处理程序自动分拆成无数个较小的子程序，再交由多个服务器所组成的庞大系统经搜寻、计算分析之后将处理结果回传给用户。通过云计算技术，网络服务提供者可以在数秒之内，形成处理数以千万计甚至数以亿计的数据，提供与超级计算机具有同样强大效能的网络服务。

人类通过各种信息感应、探测、识别、定位、跟踪和监控等手段和设备实现对物理世界的“感、知、控”，这一环节称为物联网的“前端”；而基于互联网计算的智能以及对物理世界的反馈和控制称为物联网的“后端”。当前无论学术界还是工业界，目光普遍聚焦在物联网的“前端”，但物联网的“后端”也同样重要。从“后端”出发，物联网可以看成一个基于互联网的，以提高物理世界的运行水平、管理水平、资源使用效率为目标的大规模信息系统。该系统具备实时感应、高度并发、自主协同和涌现效应等特征。

物联网的发展需要“软件即服务”“平台即服务”及按需计算等云计算模式的支撑。可以说，云计算是物联网应用发展的基石。其原因有两个：一是云计算具有超强的数据处理和存储能力；二是物联网无处不在的数据采集，需要大范围的支撑平台以满足其规模需求。云计算以如下几种方式支撑物联网的应用发展。

1）单中心、多终端应用模式

在单中心、多终端应用模式中，分布范围较小的各物联网终端（传感器、摄像头或 5G 手机等）把云中心或部分云中心作为数据/处理中心，终端所获得的信息和数据统一由云中心处理和存储，云中心提供统一界面给使用者操作或查看。单中心、多终端应用模式目前已比较成熟，如小区及家庭的监控、对某一高速路段的监测、某些公共设施的保护等。这类应用模式的云中心可提供海量存储和统一界面、分级管理等服务，这类云计算中心一般以私有云居多。

2）多中心、多终端应用模式

多中心、多终端应用模式主要用于区域跨度较大的企业和单位。例如，一个跨多地区或多国家的企业，因其分公司或分厂较多，要对各公司或工厂的生产流程进行监控、对相关的产品进行质量跟踪等。当有些数据或信息需要及时甚至实时地给各个终端用户共享时，也可采取这种模式。例如，某气象预测中心探测到某地 30 分钟后将发生重大气象灾害，通过以云计算为支撑的物联网途径，用几十秒的时间就能将预报信息发出。这种应用模式的前提是云计算中心必须包含公共云和私有云，并且它们之间的互联没有障碍。

3）信息与应用分层处理、海量终端的应用模式

这种应用模式主要针对用户范围广、信息及数据种类多、安全性要求高等场合。根据应用模式和具体场景，对各种信息、数据进行分类、分层处理，然后选择相关的途径提供给相应的终端。例如，对需要大数据量传送，但是安全性要求不高的数据，如视频数据、游戏数据等，可以采取本地云中心处理或存储的方式；对于计算要求高，数据量不大的数据，可以

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IN

放在专门负责高端运算的云中心；而对于数据安全要求非常高的信息和数据，则可以由具有灾备中心的云中心处理。

实现云计算的关键技术是虚拟化技术。通过虚拟化技术，单个服务器可以支持多个虚拟机，运行多个操作系统，从而提高服务器的利用率。虚拟机技术的核心是虚拟机监控程序（Hypervisor）。Hypervisor 在虚拟机和底层硬件之间建立一个抽象层，它可以拦截操作系统对硬件的调用，为驻留在其上的操作系统提供虚拟的 CPU 和内存。

云计算为众多用户提供了一种新的高效率计算模式，兼有互联网服务的便利、廉价和大型机的能力。它的目的是将资源集中于互联网上的数据中心，由云中心提供应用层、平台层和基础设施层的集中服务，以解决传统 IT 系统零散性带来的低效率问题。云计算是信息化发展进程中的一个阶段，强调信息资源的聚集、优化、动态分配和回收，旨在节约信息化成本、降低能耗、减轻用户信息化的负担、提高数据中心的效率。云计算出现的初衷是解决特定大规模数据处理问题，因此它被业界认为是支撑物联网“后端”的最佳选择，云计算为物联网提供后端处理能力与应用平台。目前，国外已经有多个云计算的科学研究项目，比较有名的是 Scientific Cloud 和 Open Nebula 项目。产业界也在投入巨资部署各自的云计算系统，参与者主要有 Google、Amazon、IBM、Microsoft 等。国内关于云计算的研究也已起步，并在计算机系统虚拟化基础理论与方法研究方面取得了阶段性成果。

1.4 物联网的起源与发展

当物联网最初被提出时，只是停留在给全球每个物品一个代码，实现物品跟踪与信息传递的设想。如今，美国、欧盟，以及日本、韩国和我国都把物联网提升为国家战略，物联网的发展已经不仅仅是 IT 行业的发展，而是上升为国家综合竞争力的体现，物联网本身则被称为继计算机、互联网之后世界信息产业的第三次浪潮。

1.4.1 物联网概念的诞生

1999 年，美国麻省理工学院最早明确地提出了物联网的概念：给物品贴上一个射频识别（Radio Frequency Identification，RFID）的电子标签，电子标签内存储物品的信息（产地、原料组成、生产日期等），通过 RFID 完成对物品的识别，从而获取物品的信息，然后借助于互联网，将物品的信息在网上发布，在全球范围内实现对物品信息的共享，进而可以对物品进行智能管理。

2005 年，国际电信联盟（ITU）在峰会上提出了物联网的概念，物联网真正受到了广泛关注。2005 年 11 月 17 日，在突尼斯举行的信息社会世界峰会上，ITU 发布了《ITU 互联网报告 2005：物联网》，正式提出了“物联网”的概念。

ITU 的报告着重呈现了新兴技术、市场机会、政策问题等信息，深入探讨了物联网的技术细节及其对全球商业和个人生活的影响。ITU 的报告指出，无所不在的“物联网”通信时代即将来临，通过 RFID 和传感器等都可以获取物体的信息，世界上所有的物体都可以通过互联网主动进行信息交换。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

1.4.2 物联网在国外的发展

1. 物联网在美国的发展概况

2008 年 11 月，IBM 公司提出了智慧地球的概念。智慧地球是指将新一代的 IT 技术充分运用到各行各业之中，具体来说就是把感应器等嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、油气管道等各种物体中，并且普遍连接，形成物联网；然后将物联网与现有的互联网整合起来，实现人类社会与物理系统的整合，从而达到“智慧”的状态。

2009 年 1 月，奥巴马与美国科技界举行了一次“圆桌会议”，IBM 首席执行官彭明盛提出了“智慧地球”的建议。奥巴马对“智慧地球”的构想给予积极回应，并将其提升为国家发展战略。

2. 物联网在欧盟的发展概况

1）欧盟的“物联网欧洲行动计划”

2009 年 6 月，欧盟在比利时首都布鲁塞尔向欧洲议会、欧洲理事会、欧洲经济与社会委员会和地区委员会提交了“物联网欧洲行动计划”，欧盟希望构建物联网框架。“物联网欧洲行动计划”有如下 14 项行动。

行动 1 体系：定义一套基本的物联网治理原则，建立一个足够分散的架构，使得各地的行政当局能够在透明度、竞争和问责等方面履行自己的职责。

行动 2 隐私：持续地监督隐私和私人数据保护问题，还将公布泛在信息社会隐私与信任的指导意见。

行动 3 芯片沉默：开展有关“芯片沉默权利”技术和法律层面的辩论，它将涉及不同用户在使用不同的名字表达个人想法时，可以随时断开他们的网络。

行动 4 风险：提供一个政策框架，使物联网迎接信任、接入和安全方面的挑战。

行动 5 重要资源：物联网基础设施将成为欧洲的重要资源，特别是要将其与关键的信息基础设施联系在一起。

行动 6 标准：对现有及未来与物联网相关的标准进行评估，必要时推出附加标准。

行动 7 资助：持续资助物联网方面的研究项目，特别是微电子学、非硅组件、能源获取技术、无线通信智能系统网络、隐私与安全及新的应用等重要的技术领域。

行动 8 合作：筹备在绿色轿车、节能建筑、未来工厂、未来互联网 4 个物联网能发挥重要作用的领域与公共及私营部门之间开展合作。

行动 9 创新：将考虑通过 CIP（竞争与创新框架计划）推出试验项目的方式，推动物联网应用的进程。试验项目集中于电子健康、电子无障碍、气候变化等领域。

行动 10 通报制度：欧盟委员会将定期向欧洲议会、欧洲理事会及其他相关机构通报物联网的进展。

行动 11 国际对话：将在物联网所有方面加大与国际合作伙伴现有的对话力度，目的是在联合行动、共享最佳实践和推进各项工作实施上取得共识。

行动 12 RFID 再循环：将评估推行再循环 RFID 标签的难度以及将现有 RFID 标签作为再循环物的利弊。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

行动 13 检验：对物联网相关技术定期检测，并评估这些技术对经济和社会的影响。

行动 14 演进：开展与世界其他地区的定期对话，并分享物联网最佳实践。

2）欧盟对于物联网发展的预测

欧洲智能系统集成技术平台（EPoSS）在 *Internet of Things in 2020* 报告中预测，物联网的发展将经历 4 个阶段：2010 年之前 RFID 被广泛应用于物流、零售和制药领域，2011—2015 年物体互联，2015—2020 年物体进入半智能化，2020 年之后物体进入全智能化。

3. 物联网在日本的发展概况

2001 年以来，日本相继制定了“e-Japan”战略、“u-Japan”战略、“i-Japan”战略等多项信息技术发展战略，从大规模信息基础设施建设入手，拓展和深化信息技术应用。

1）“e-Japan”战略

2001 年 1 月实施“e-Japan”战略。“e”是指英文单词“Electronic”。“e-Japan”战略在宽带化、信息基础设施建设、信息技术的应用普及等方面取得了进展。

2）“u-Japan”战略

2004 年 12 月发布“u-Japan”战略。“u”是指英文单词“Ubiquitous”，意为“普遍存在的，无所不在的”。“u-Japan”战略是希望建成一个在任何时间、任何地点，任何人都可以上网的环境，实现人与人、物与物、人与物之间的连接。

3）“i-Japan”战略

2009 年 7 月颁布“i-Japan”战略。“i”有两层含义：一是指像用水和空气那样应用信息技术（Inclusion），使之融入日本社会的每一个角落；二是指创新（Innovation），激发新的活力。“i-Japan”战略提出“智慧泛在”构想，将传感器网络列为国家重点战略之一，致力于构建个性化的物联网智能服务体系。

4. 物联网在韩国的发展概况

2006 年，韩国提出了“u-Korea”战略，重点支持泛在网的建设。“u-Korea”战略旨在建立智能型网络，为民众提供无所不在的便利生活，扶持 IT 产业发展新兴技术，强化产业优势和国家竞争力。

2009 年 10 月，韩国通信委员会出台了“物联网基础设施构建基本规划”。该规划确定了构建物联网基础设施、发展物联网服务、研发物联网技术、营造物联网扩散环境四大领域。该规划确立了 2012 年“通过构建世界最先进的物联网基础设施，实现未来广播通信融合领域超一流信息通信技术（ICT）强国”的目标。

1.4.3 物联网在国内的发展

与国外相比，我国物联网的发展取得了重大进展，下面从应用、政策等方面进行介绍。

1. 金卡工程

2004 年，我国把射频识别作为“金卡工程”的一个重点，启动了 RFID 的试点，以 RFID 的广泛应用作为全国物联网发展的基础。中华人民共和国工业和信息化部（以下简称工信部）指出：RFID 是物联网的基础，先抓 RFID 的标准、产业和应用，把这些做好了，就自然而然

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

地会从闭环应用发展到开环应用，形成我国的物联网。

2004 年以后，我国每年都推出新的 RFID 应用试点，项目涉及身份识别、电子票证、动物和食品追踪、药品安全监管、煤矿安全管理、电子通关与路桥收费、智能交通与车辆管理、供应链与现代物流管理、危险品与军用物资管理、贵重物品防伪、票务及城市重大活动管理、图书及重要文档管理、数字化景区及旅游等。

2. RFID 行业应用

2008 年年底，我国铁路 RFID 应用已基本涵盖了铁路运输的全部业务，成为我国应用 RFID 最成功的案例。铁路车号自动识别系统（ATIS）是我国最早应用 RFID 的系统，也是应用 RFID 范围最广的系统，并且拥有自主知识产权。采用 RFID 技术以后，铁路车辆管理系统实现了统计自动化，降低了管理成本，可实时、准确、无误地采集机车车辆的运行数据，如机车车次、车号、状态、位置、去向、到发时间等信息。

2010 年，上海世博会召开，为提高世博会信息化水平，上海市在世博会上大量采用了 RFID 系统。世博会使用了嵌入 RFID 技术的门票，用于对主办者、参展者、参观者、志愿者等各类人群的信息服务，包括人流疏导、交通管理、信息查询等。上海世博会期间，相关水域的船舶也安装了船舶自动识别系统（AIS），相当于给来往船只设置了一个“电子身份证”，没有安装“电子身份证”的船舶将面临停航或改航。世博会在食品管理方面启用了“电子标签”，以确保食品的安全，只要扫描一下芯片，就能查到园区内任何一种食物的来源。事实上，RFID 在大型会展中的应用早已得到验证，在 2008 年的北京奥运会上，RFID 技术就已得到广泛应用，有效提高了北京奥运会的举办水平。

3. 我国掀起物联网高潮

2006 年，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》将物联网列入重点研究领域。2009 年 9 月，“传感器网络标准工作组成立大会暨‘感知中国’高峰论坛”在北京举行。2010 年 3 月，教育部办公厅下发《关于战略性新兴产业相关专业申报和审批工作的通知》，我国高校开始创办物联网工程专业。2010 年 9 月，国务院通过《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》，确定物联网等新一代信息技术为我国 7 个战略性新兴产业之一。2015 年 7 月，国务院发布《关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》，“互联网+”将在协同制造、现代农业、智慧能源、普惠金融、益民服务、高效物流、电子商务、便捷交通、绿色生态和人工智能方面开展重点行动，这将进一步加快我国物联网的发展。

1.4.4 物联网进入 2.0 时代

2017 年，物联网产业界出现了一个新名词“物联网 2.0”。随着人工智能、大数据、云计算、5G（第五代移动通信）等的发展完善，“物联网”从提出到发展，从实践到创新，已经悄然迈入了 2.0 时代。

1. 对物联网认知的统一

物联网 2.0 时代的一个显著特征是对各种技术认知的统一：云计算、大数据、智能硬件、人工智能等领域的企业开始认可自己是物联网产业链的一个环节。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2011—2016 年，从云计算企业到智慧城市企业，从移动互联网企业到大数据企业，从智能硬件企业到人工智能企业，几乎每年都有新企业引领新技术的诞生。但是，当时这些主流企业并不认可物联网，认为自己的企业才是未来，并且认为物联网是过去时。2017 年，物联网产业界出现了一个新名词“物联网 2.0”，终于对物联网的认知进行了统一。

2. 物联网 2.0 的特征

1）“物联网即服务”的落地

既然称为物联网 2.0 时代，当然是比物联网 1.0 时代有明显进步的。物联网 2.0 时代的另一个显著特征就是“物联网即服务”的落地。在物联网 1.0 时代，并没有真正从服务的角度去考虑物联网，反而把“感知”等当成了物联网产业的核心。

2）物联网呈现局域化、功能化、行业互联化

物联网的“人连物”“物连物”都呈现局域化、功能化、行业互联化，这形成了对物联网的具体需求，并逐渐标准化。

3）物联网平台

物联网要通过服务的方式落地，此时承担落地职责的便是物联网平台企业。在互联网时代，平台企业就有很多，现在每年都在评选互联网百强企业。到了物联网时代，平台企业只会更多，平台的属性和规模也会各异。物联网平台原则上必须至少具备 3 种能力：设备连接能力、大数据处理能力和人工智能能力。

4）物联网技术设备升级

物联网是建立在传感技术、通信技术和计算机技术之上的，每一个大的技术板块下都有很多细分技术领域，这些领域技术的创新带来了物联网技术设备的升级。例如，在感知层将传感器升级为“传感器+执行器”，传感器相当于“眼”，执行器相当于“手”，使“眼和手”能够协调一致，发挥更大的效能。又如，物联网支撑技术也在充分发展、百花齐放。为物联网应用而设计的低功耗广域网（LPWAN）快速兴起，其中，技术标准 NB-IOT 和 LoRa 是两种低功耗广域网通信解决方案，克服了主流蜂窝标准中功耗高和距离限制的问题。

5）物联网的安全性引起重视

物联网的安全性这个概念自提出以来，一直备受人们关注。今后，物联网的安全性将成为一个相对独立的研究领域，并得到足够的重视与发展。

3. 物联网 2.0 发展现状

1）物联网技术标准

过去的物联网技术设备还存在很多不足，物联网的情景也不同，标准无法统一。如今，移动物联网已形成由 NB-IOT（窄带物联网）、eMTC（增强型机器类通信）、5G（第五代移动通信）等共同构成的技术体系，形成了标准体系间的互联互通。我国开始了全球最大的 NB-IOT 网络的筹建，将在全网部署 30 万个 NB-IOT 基站。华为公司也先后发布了 NB-IOT 和物联网操作系统 LiteOS 的解决方案。

2）物联网产业环境

在物联网 1.0 时代，物联网相关产业结构、链条不完整。未来几年，物联网将迎来井喷式发展，物联网的广泛应用不仅将改造、提升传统产业，促进先进制造业的发展，更将培育发

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

展新兴产业，促进现代服务业的发展。目前，我国已初步形成涵盖芯片、模组、系统、平台的移动物联网产业体系，在工业自动控制、环境保护、医疗卫生、公共安全等领域设立了一系列应用试点进行示范，并取得了进展。

3）物联网应用场景

物联网发展的关键在于应用，人们从最初“只知技术、不明用途”的探索阶段，发展到如今已明确这一新技术能应用到什么领域、解决什么问题。

2017 年，我国开始流行共享单车，只要拿出手机扫一扫，便可打开智能锁骑行，这些智能锁使用的就是物联网技术。随着物联网技术的发展，共享单车、数字眼镜、儿童跟踪器、智能手表等相继出现。物联网 2.0 要求各行各业都能以行业应用为切入点，提出解决方案，通过人工智能、大数据、云计算、5G 等技术的完善，不断提升人工智能的水平，完善语言助手技术，加强物联网的安全性与信任感，使操控方式迭代升级。

1.5 互联网与物联网

互联网是 20 世纪人类伟大的发明。互联网的出现使人们的交往方式、社会和文化形态发生了重大变化，不仅改变了现实世界，更催生了虚拟世界。互联网缩短了人与人之间的时空距离。

物联网是在互联网基础上的进一步延伸和发展，二者既有相同之处又有不同之处。物联网连接了人与人、人与物、物与物。如果说互联网扩充和丰富了“地球村”的内涵，那么物联网将带领人们走向“智慧的地球”。

1.5.1 互联网的概念

美国联邦网络委员会（FNC）认为 Internet 是全球性的信息系统。Internet 通过全球性唯一的地址逻辑地连接在一起，这个地址是建立在 IP 或今后其他协议基础之上的，可以通过 TCP/IP，或者今后其他接替的协议或与 IP 兼容的协议来进行通信，可以让公共用户或私人用户使用高水平的服务，这种服务是建立在上述通信及相关的基础设施之上的。Internet 示意图如图 1-6 所示。

具体而言，互联网是一个网络实体，没有一个特定的网络边界，泛指通过网关连接起来的网络集合，即一个由各种不同类型和规模的独立运行与管理的计算机网络组成的全球范围的计算机网络。组成互联网的计算机网络包括局域网（LAN）、城域网（MAN）以及大规模的广域网（WAN）等。这些网络通过普通电话线、高速率专用线路、卫星、微波和光缆等通信线路，把不同国家的大学、公司、科研机构和政府等组织以及个人的网络资源连接起来，从而进行通信和信息交换，实现资源共享。

经过多年的发展，互联网已经在社会的各个层面为全人类提供便利。电子邮件、即时消息、视频会议、网络日志、网上购物等已经成为越来越多人的一种生活方式；而基于 B2B、B2C 等平台的电子商务、跨越洲际的商务会谈以及电子政务等为商业与政府办公创造了更加安全、便捷的环境。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

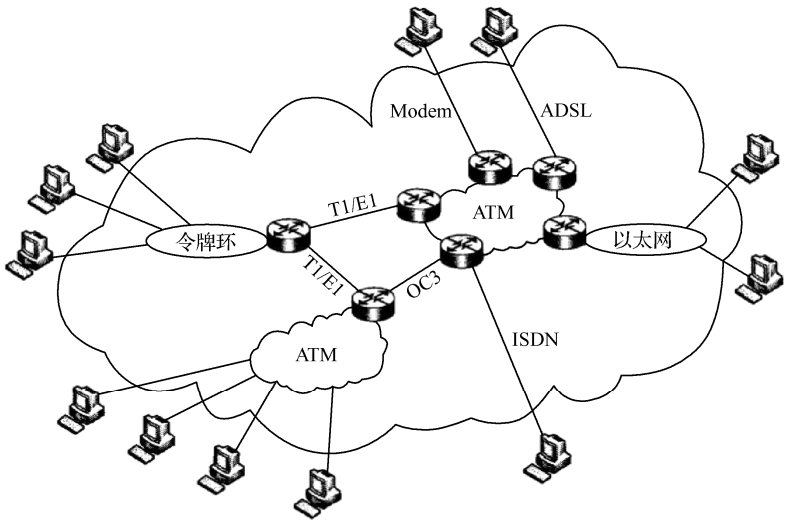


图 1-6 Internet 示意图

1.5.2 互联网与物联网的关系

互联网是由计算机连接而成的全球网络，即广域网、局域网及个人计算机按照一定的通信协议组成的国际计算机网络。物联网可以说是互联网的升级版，“物联网就是物物相连的互联网”，它的核心和基础依然是互联网。那么物联网和互联网到底有哪些区别呢？物联网时代与互联网时代有何不同之处呢？

1. 互联网是物联网的基础

可以从互联网和物联网的主要作用来看两者的不同之处，互联网的产生是为了让人通过网络交换信息，其服务的主体是人。而物联网为物而生，主要为了管理物，让物自主地交换信息，服务于人。既然物联网为物而生，要让物具备智能，物联网的真正实现必然比互联网的实现更难。另外，从信息的进化上讲，从人的互联到物的互联，是一种自然的递进，本质上互联网和物联网都是人类智慧的物化而已，人的智慧对自然界的影响才是信息化进程本质的原因。

物联网比互联网技术更复杂，产业辐射面更宽，应用范围更广，对经济社会发展的带动力和影响力更强。但是如果没有互联网作为物联网的基础，那么物联网将只是一个概念。互联网注重信息的互联互通和共享，解决的是人与人的信息沟通问题。这样就为通过人与人、人与物、物与物的相连以解决信息化的智能管理和决策控制问题的物联网提供了前期的沟通渠道。

2. 互联网和物联网终端连接方式不同

互联网用户通过服务器、台式计算机、笔记本电脑和移动终端访问互联网资源，发送或接收电子邮件，阅读新闻，写博客或读博客，通过网络电话通信，在网上买卖股票，订机票、酒店等。

而物联网中的传感器节点需要通过无线传感器网络的汇聚节点接入互联网；RFID 芯片通

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

过读写器与控制主机连接，再通过控制节点的主机接入互联网。由于互联网与物联网的应用系统不同，所以接入方式也不同。物联网应用系统将根据需要选择无线传感器网络或 RFID 应用系统接入互联网。互联网需要人自己来操作才能得到相应的资料，而物联网数据是由传感器或 RFID 读写器自动读出的。

3. 物联网涉及的技术范围更广

物联网运用的技术主要包括无线技术、互联网、智能芯片技术、软件技术，几乎涵盖了信息通信技术的所有领域，而互联网只是物联网的一个技术方向。互联网只能是一种虚拟的交流，而物联网实现的就是实物之间的交流。所以物联网涉及的技术范围更广，未来发展的前景更好。

4. 物联网是让中国技术走在世界前列的机遇

互联网兴起和发展的时候，中国还毫无知觉。当中国意识到的时候，已经被发达国家甩得老远。物联网的概念是在 1999 年提出的，那时中国政府和一些产业专家就看到了物联网的未来前景，所以中国政府这几年不管从政策上还是资金上都给予了最直接的帮助，这样物联网的发展与其他国家相比就没有输在起跑线上，具有同发优势。现在，中国已成为物联网国际标准制定的主导国之一。

1.5.3 H2H 与 T2T 的发展路线

人到人（Human to Human，H2H）是指人之间不依赖于计算机而进行的互联，因为互联网并没有考虑到物与物连接的问题。物到物（Things to Things，T2T），顾名思义就是物与物的连接。

许多学者讨论物联网时，经常会引入一个 M2M 的概念，可以解释成人到人（Man to Man）、人到机器（Man to Machine）、机器到机器（Machine to Machine）。从本质上而言，在人与机器、机器与机器的交互中，大部分是为了实现人与人之间的信息交互。实际上，M2M 所有的解释在现有的互联网中都可以实现，人与人之间的交互可以通过互联网进行，人与机器的交互一直是人体工程学和人机界面领域研究的主要课题，而机器与机器的交互已经由互联网提供了最成功的方案。

在物联网研究中不应该采用 M2M 概念，这是容易造成思路混乱的概念，应该采用 ITU 定义的 T2T 和 H2H 的概念。

这里的“物”要满足以下条件才能够被纳入“物联网”的范围。

（1）要有数据传输通路；

（2）要有一定的存储功能；

（3）要有专门的应用程序；

（4）遵循物联网的通信协议；

（5）在世界网络中有可被识别的唯一编号。

T2T 主要有两个发展趋势，一个是 IP 化，另一个是智能化。IP 化是指给物联网内的物一个全球唯一的标识；智能化是指使物具备自主交换信息的能力，实现信息处理，从而使物也具备智能。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

思考与练习

1．什么是物联网？
2．物联网的技术特征是什么？
3．简述物联网的国内外发展概况。
4．简述物联网与互联网的区别和联系。
5．物联网的内涵是什么？
6．谈谈物联网和具体的行业结合，可以产生怎样的应用前景。

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

第2章

传感器技术

【学习要求】

（1）了解传感器的概念、作用，掌握传感器的组成、分类和基本特性。

（2）了解常用传感器基本原理，如温度传感器、湿度传感器、超声波传感器和气敏传感器。

（3）了解传感器的应用。

人们为了从外界获取信息，必须借助于感觉器官。而单靠人自身的感觉器官来研究自然现象和生产规律，显然是远远不够的。为了获取更多的信息，必须借助于传感器。传感器是人类感觉器官的延长，能够感受到待测的物理量、化学量或生物量等信息。

在物联网中，传感器主要用于感知物体，通过在物体上植入各种微型的传感装置，使物体智能化，这样任何物体都可以变得“有感觉、有思想”。传感器还可以组成无线传感器网络。无线传感器网络能够实时采集网络分布区域内目标对象的各种信息，是一种全新的信息获取平台。传感器与无线传感器网络是物联网感知层的重要组成部分，将带来信息感知的一场变革。

2.1 传感器概述

在物联网的感知层中，信息的获取与数据的采集主要采用自动识别技术和传感器技术。自动识别技术与传感器技术完全不同。自动识别技术首先在物体上放置标签，通过识别装置与标签的接近，读取标签中的信息，从而自动获取被识别物体的相关信息。传感器是一种能把物理量、化学量或生物量转换成便于分析处理的电信号等的器件，可以感知周围的温度、速度、电磁辐射或气体成分等，主要用来采集传感器周围的各种信息。

2.1.1 传感器的概念

1. 传感器的定义

国际电工委员会（IEC）对传感器（Sensor/Transducer）的定义为：传感器是测量系统中的一种前置部件，它将输入变量转换成可供测量的信号。传感器是一种以一定的精确度把“被测量”转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置，能完成检测任务；它的输入量是某一“被测量”，可能是物理量，也可能是化学量、生物量等；它的输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，可以是气、光、电量，但主要是电量；输入与输出的转换规律已知，转换精度要满足测控系统的应用要求。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

根据传感器应用场合或应用领域的不同，其叫法也不同。例如，传感器在过程控制中被称为变送器，在射线检测中被称为发送器、接收器或探头。

2. 传感器的组成

根据我国国家标准 GB/T 7665—2005，传感器是能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件直接感受“被测量”，并输出与“被测量”有确定关系的物理量；转换元件将敏感元件的输出作为它的输入，将输入物理量转换为电路参量；由于转换元件输出的信号（一般为电信号）都很微弱，传感器一般还须配以转换电路，最后以电量的方式输出。这样，传感器就完成了从感知“被测量”到输出电量的全过程。传感器的基本组成如图 2-1 所示。

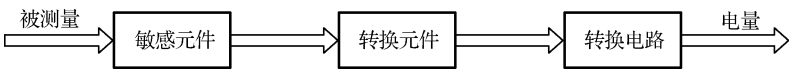


图 2-1 传感器的基本组成

例如，应变式压力传感器是由弹性膜片和电阻应变片组成的，其中弹性膜片是敏感元件，将压力转换为弹性膜片的应变；电阻应变片是转换元件，弹性膜片的应变施加在电阻应变片上，电阻应变片将其转换成电阻的变化量。这里需要说明的是，图 2-1 所示的传感器只是一般形式。例如，由半导体材料组成的传感器基本是将敏感元件和转换元件合二为一的，如压电传感器、光电池、热敏电阻等，这些传感器直接将被测量转换为电量输出。

2.1.2 传感器的作用

传感器又称电五官，传感器的作用可以通过与人类感觉器官的比较给出。传感器与人类五大感觉器官的比较见表 2-1。

表 2-1 传感器与人类五大感觉器官的比较

传 感 器	人的感觉器官
光敏传感器	人的视觉
声敏传感器	人的听觉
气敏传感器	人的嗅觉
化学传感器	人的味觉
压敏、温敏、流体传感器	人的触觉

2.1.3 传感器的分类

传感器的品种丰富，原理各异，检测对象门类繁杂，因此分类方法非常多。目前，传感器没有统一的分类方法，人们通常站在不同的角度，突出某一侧面对传感器进行分类。下面是几种常见的传感器分类方法。

1. 按工作原理分类

按不同学科的原理、规律、效应等分类，传感器一般可以分为物理型、化学型、生物型

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

等。以物理效应为例，诸如压电效应、磁致伸缩效应、极化效应、热电效应、光电效应、磁电效应等，都可以作为传感器的分类依据。以化学效应为例，诸如化学吸附、电化学反应等，都可以作为传感器的分类依据。以生物效应为例，诸如酶、抗体、激素等分子的识别功能，都可以作为传感器的分类依据。传感器按工作原理分类举例见表 2-2，表中给出了变换原理和传感器举例。

表 2-2　传感器按工作原理分类举例

变 换 原 理	传感器举例
变换电阻	电位器式、应变式、压阻式、光敏式、热敏式
变换磁阻	电感式、差动变压器式、涡流式
变换电容	电容式、湿敏式
变换谐振频率	振动膜式
变换电荷	压电式
变换电势	霍尔式、感应式、热电偶式

2. 按用途分类

按用途分类，传感器可以分为方位传感器、水位传感器、能耗传感器、速度传感器、加速度传感器、烟雾传感器、温度传感器、湿度传感器、射线辐射传感器等。

3. 按敏感材料分类

在外界因素的作用下，所有材料都会做出相应的、具有特征性的反应，那些对外界作用非常敏感的材料，被用来制作成传感器的敏感元件。按敏感材料分类，可分为金属传感器、半导体传感器、陶瓷传感器、磁性材料传感器、多晶传感器等。

2.1.4　传感器的一般特性

传感器要感受“被测量”的变化，并将其不失真地变换成相应的电量，这取决于传感器的特性。传感器的一般特性是指传感器系统的输出-输入关系特性。

1. 传感器特性的分析方法

传感器是一个系统，传感器的一般特性是指这个系统的输出-输入关系特性。传感器系统可以看成两端口网络，传感器的一般特性可以用两端口网络的输出-输入特性来表示，即系统输出量 y 与输入量 x（被测量）之间的关系，如图 2-2 所示。

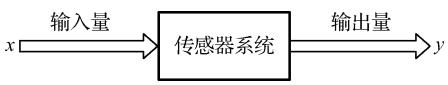


图 2-2　系统输出量 y 与输入量 x（被测量）之间的关系

传感器的一般特性分为静态特性和动态特性。如果输入量不随时间变化，称为传感器的静态特性；如果输入量随时间变化，称为传感器的动态特性。传感器可以建立数学模型（静态模型和动态模型），在数学模型的基础上再讨论传感器的一般特性（静态特性和动态特性）。

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2. 传感器的静态模型

静态模型是指在输入静态信号（输入信号不随时间变化）的情况下，传感器输出量 y 与输入量 x 之间的数学关系。这时输入量和输出量都与时间无关，传感器的静态特性可以用一个不含时间变量的方程来表示。如果不考虑迟滞和蠕变效应，静态模型可以由下面的方程式表示。

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \tag{2-1}$$

式中，a_0 为零位输出；a_1 为传感器的线性灵敏度，常用 K 或 S 表示；$a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为传感器的非线性项的待定常数。

3. 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指当被测量处于稳定状态（$x(t)$=常量）时，传感器输出量与输入量之间的关系。也常把输入量作为横坐标、把输出量作为纵坐标来绘制曲线描述传感器的静态特性。衡量传感器静态特性的技术指标主要有线性度、灵敏度、迟滞、重复性、精度、分辨力、漂移、测量范例、量程等。

1）线性度

传感器输出量与输入量的关系可以分为线性关系和非线性关系，线性度是指传感器输出量与输入量之间的线性程度。从传感器的性能来看，人们希望是线性关系。但实际的传感器大多为非线性关系，常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线。为使仪表具有均匀刻度的读数，拟合直线有多种方法，图 2-3 给出了 4 种直线拟合的方法。

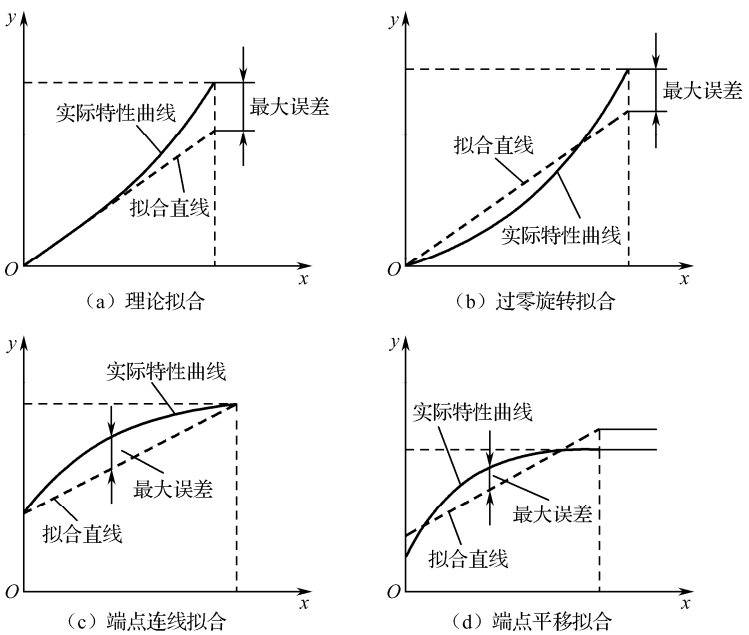


图 2-3　4 种直线拟合的方法

2）灵敏度

灵敏度是输出-输入关系特性曲线的斜率。灵敏度是传感器在稳态下输出量的增量Δy 与输

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

入量的增量Δx 的比值，这里用 K 表示，其表达式为

$$K=\frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{2-2}$$

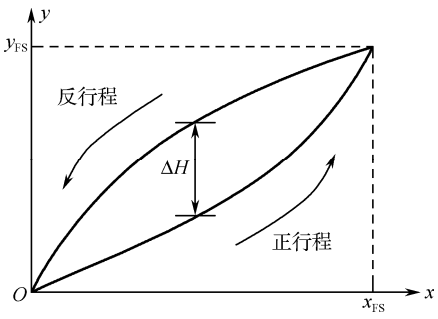


图 2-4　传感器的迟滞特性

3）迟滞

传感器在输入量由小到大（正行程）及输入量由大到小（反行程）变化期间，其输入–输出关系特性曲线不重合的现象称为迟滞，如图 2-4 所示。

4）重复性

重复性是指传感器在输入量上按同一方向做全程连续多次变化时，所得特性曲线不一致的程度。重复性为传感器在相同测量方法、相同测量仪器、相同使用条件、相同地点等条件下，对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的符合程度。

5）精度

精度是指测量结果的可靠程度。误差越小，精度越高。传感器的精度是量程内最大基本误差与满量程的百分比，表达式为

$$\delta=\frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}}\times 100\% \tag{2-3}$$

式中，$\Delta_{\max}$ 为最大基本误差。在工程中，常引入精度等级的概念。精度等级以一系列标准百分比数值分级表示，如 0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 等。

6）漂移

如果传感器所传送的信号发生了改变，即产生了漂移。漂移主要包括零点漂移和灵敏度漂移。零点漂移或灵敏度漂移又分为时间漂移和温度漂移。当传感器的输入和环境温度不变时，输出量随时间变化的现象称为时间漂移，又称“时漂”。由外界温度变化引起的输出量变化的现象称为温度漂移，又称“温漂”。

4. 传感器的动态模型

动态模型是指在动态信号（输入信号随时间变化）作用下，传感器输出量 $y(t)$与输入量 $x(t)$之间的数学关系。动态模型常用微分方程、传递函数和频率特性表示。

1）微分方程

绝大多数传感器都属于模拟系统，描述模拟系统的一般方法是采用微分方程，传感器输出量与输入量之间为时域关系。

2）传递函数

为了求解方便，常采用拉氏变换，$Y(s)$为输出量 $y(t)$的拉氏变换，$X(s)$为输入量 $x(t)$的拉氏变换，并常用传递函数 $H(s)$描述传感器的特性，$H(s)=Y(s)/X(s)$。

3）频率特性

如果传感器的输入量为正弦信号，常用频率特性描述传感器的特性。频率响应特性为 $H(\mathrm{j}\omega)=Y(\mathrm{j}\omega)/X(\mathrm{j}\omega)$。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

5. 传感器的动态特性

动态特性是指传感器输入量随时间变化时，输出量随时间变化的特性。有良好静态特性的传感器，未必有良好的动态特性。

传感器的动态特性可以从时域和频域两个方面，分别采用瞬态响应法和频率响应法进行研究。最常用的标准输入信号有阶跃信号和正弦信号两种。在时域内，通常利用阶跃信号研究传感器的瞬态响应特性。在频域内，通常利用正弦信号研究传感器的频率响应特性。

6. 传感器常用的特性参数

传感器常用的特性参数如下。

（1）测量范围：在允许误差内的“被测量”的取值范围。

（2）量程：测量范围上限值与下限值的代数差。

（3）精度：“被测量”的测量结果与真值间的一致程度。

（4）重复性：对同一“被测量”进行多次连续测量所得结果之间的符合程度。

（5）蠕变：当“被测量”的环境条件保持恒定时，在规定时间内输出量的变化。

（6）阈值：能使传感器输出端产生可测变化量的被测量的最小量。

（7）零位：使输出的绝对值为最小的状态，如平衡状态。

（8）激励：为使传感器正常工作而施加的外部能量（如电压或电流）。

（9）最大激励：能够施加到传感器上的激励电压或激励电流的最大值。

（10）输入阻抗：传感器输入端口所呈现的阻抗，是指一个电路输入端的等效阻抗。

（11）输出阻抗：传感器输出端口所呈现的阻抗，是指一个电路输出端的等效阻抗。

（12）零点输出：在室内条件下，所加“被测量”为零时传感器的输出。

（13）迟滞：在规定的范围内，当被测量的值增加或减少时，输出中出现的最大差值。

（14）滞后：输出信号变化相对于输入信号变化的时间延迟。

（15）漂移：在一定的时间间隔内，传感器输出中有与“被测量”无关的、不需要的变化量。

（16）零点漂移：在规定的时间间隔及室内条件下零点输出的变化。

（17）灵敏度：传感器输出量的增量与相应的输入量的增量之比。

（18）灵敏度漂移：由于灵敏度的变化而引起的校准曲线斜率的变化。

（19）时间漂移：在规定的条件下，零点或灵敏度随时间推移而发生的缓慢变化。

（20）温度漂移：由于周围温度变化而引起的零点或灵敏度的漂移。

（21）线性度：校准曲线与某一规定直线一致的程度。

（22）非线性度：校准曲线与某一规定直线偏离的程度。

（23）长期稳定性：传感器在规定的时间内保持不超过允许误差的能力。

（24）固有频率：在无阻力时，传感器的自由（不加外力）振荡频率。

（25）响应：输出时被测量变化的特性。

（26）补偿温度范围：使传感器保持量程和规定极限内的零平衡所补偿的温度范围。

（27）分辨率：是指传感器可感受到的被测量最小变化的能力。当输入变化值未超过某一数值时，传感器的输出不会发生变化，即传感器对此输入量的变化是分辨不出来的。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2.1.5 传感器的技术特点

传感器技术涉及传感器的机理研究与分析、设计与研制、性能与应用等。传感器技术有如下特点。

1. 内容离散，涉及多个学科

传感器的内容离散，涉及物理学、化学、生物学等多个学科。物理型传感器是利用物理性质制成的传感器。例如，“热电偶”是利用金属的温差电动势和接触电动势效应制成的温度传感器，压力传感器利用压电晶体的正压电效应实现对压力的测量。化学型传感器是利用电化学反应原理制成的传感器。例如，离子敏传感器利用电极对溶液中离子的选择性反应，测量溶液的酸碱度；电化学气体传感器利用被测气体在特定电场下的电离测量气体的浓度。生物型传感器是利用生物效应制成的传感器。例如，第一代生物传感器将葡萄糖氧化酶固化并固定在隔膜氧电极上，制成了葡萄糖传感器；第二代生物传感器是微生物、免疫、酶免疫和细胞器传感器。

2. 种类繁多，彼此相互独立

传感器的种类繁多，被测参数彼此之间相互独立。被测参数包括热工量（温度、压力、流量、物位等）、电工量（电压、电流、功率、频率等）、机械量（力、力矩、位移、速度、加速度、转角、角速度、振动等）、化学量（氧、氢、一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫、瓦斯等）、物理量（光、磁、声、射线等）、生物量（血压、血液成分、心音、激素、肌肉张力、气道阻力等）、状态量（开关、二维图形、三维图形等）等。

3. 技术复杂，工艺要求高

传感器的制造涉及许多高新技术，如集成技术、薄膜技术、超导技术、微细或纳米加工技术、黏合技术、高密封技术、特种加工技术、多功能化和智能化技术等，比较复杂。传感器的制造工艺难度大、要求高，例如微型传感器的尺寸小于 1mm，半导体硅片的厚度有时小于 1μm，温度传感器的测量范围为-196～1800℃。

4. 应用广泛，应用要求千差万别

传感器应用广泛，航天、航空、兵器、船舶、交通、冶金、机械、电子、化工、轻工、能源、环保、医疗卫生、生物工程等领域，甚至人们日常生活的各个方面，都在使用传感器。例如，阿波罗 10 运载火箭部分使用了 2077 个传感器，宇宙飞船部分使用了 1218 个传感器；汽车上有 100 多个传感器，分别使用在发动机、底盘、车身、照明装置上，用于测量温度、压力、流量、位置、气体浓度、速度、光亮度、干湿度、距离等。

5. 生命力强，不会轻易退出历史舞台

相对于信息技术的其他领域，传感器生命力强，某种传感器一旦成熟，就不会轻易退出历史舞台。例如，应变式传感器已有 70 多年的历史，目前仍然在重力测量、压力测量、微位移测量等领域占有重要地位；硅压阻式传感器也有 40 多年的历史，目前仍然在气流模型试验、

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

爆炸压力测试、发动机动态测量等领域占有重要地位。

6. 品种多样，一种“被测量”可采用多种传感器

传感器品种多样，一种“被测量”往往可以采用多种传感器检测。例如，线位移传感器的品种有 20 种之多，包括电位器式位移传感器、磁致伸缩位移传感器、电感式位移传感器、电容式位移传感器、光电式位移传感器、超声波式位移传感器、霍尔式位移传感器等。

2.1.6 传感器的发展趋势

传感器在国外的发展已有近 200 年的历史。到了 20 世纪 80 年代，由于计算机技术的发展，出现了“信息处理能力过剩、信息获取能力不足”的问题。为了解决这一问题，世界各国在同一时期掀起了一股传感器热潮，美国也将 20 世纪 80 年代视为传感器技术的年代。这些年来，传感器的发展非常迅速，目前全球传感器的种类已超过 2 万余种。现在传感器正朝着探索新理论、开发新材料、实现智能化和网络化的方向发展，传感器技术的发展水平已经成为判断一个国家现代化程度和综合国力的重要标志。

1. 传感器新原理、新材料、新工艺的发展趋势

传感器的工作原理基于各种物理、化学、生物效应和现象，发现新原理、开发新材料、采用新工艺是新型传感器问世的重要基础。

1）发现新原理

超导材料的约瑟夫逊效应发现不久，以该效应为原理的超导量子干涉仪（SQUID）传感器就问世了。SQUID 是进行超导、纳米、磁性、半导体等材料磁性研究的基本仪器设备。

2）开发新材料

在传感器领域开发的新材料包括半导体硅材料、石英晶体材料、功能陶瓷材料、光导纤维材料、高分子聚合物材料等。

3）采用新工艺

微细加工是传感器采用的新工艺。以集成电路制造技术发展起来的微机械加工工艺，可使被加工的敏感结构尺寸达到微米、亚微米级，并可以批量生产，从而制造出微型化、价格低的传感器。例如，利用半导体工艺，可制造压阻式传感器；利用晶体外延生长工艺，可制造硅-蓝宝石压力传感器；利用薄膜工艺，可制造快速响应气敏传感器。

2. 传感器微型化、多功能、集成化的发展趋势

微细加工技术的发展使传感器制造技术有了突飞猛进的发展，多功能、集成化传感器成为方向发展，使得既具有敏感功能、又具有控制执行能力的传感器微系统成为可能。

1）传感器微型化

传感器微型化是指传感器体积小、重量轻，敏感元件的尺寸为微米级，体积、重量仅为传统传感器的几十分之一甚至几百分之一。微米/纳米技术的问世，微机械加工技术的出现，使三维工艺日趋完善，这为微型传感器的研制铺平了道路。

2）传感器多功能

传感器多功能是指传感器能检测两种以上不同的“被测量”。例如，使用特殊陶瓷将温度

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

和湿度敏感元件集成在一起，构成温湿度传感器；利用厚膜制造工艺将 6 种不同的敏感材料[ZnO、SnO_2、WO_3、WO_3（Pt）、SnO_2（Pd）、ZnO（Pt）]制作在同一基板上，构成同时测量 4 种气体（H_2S、C_8H_{18}、$C_{10}H_{20}O$、NH_3）的传感器。

3）传感器集成化

传感器集成化包含传感器与集成电路（IC）的集成制造技术，以及多参量传感器的集成制造技术。美国 Honeywell 公司研制的智能压力传感器，在 3mm×4mm×0.2mm 的一块基片上，采用半导体工艺，将静压、差压、温度 3 种敏感元件与 CPU、EPROM 集成，工作温度为−40～110℃，压力量程为 0～2.1×10^7Pa，具有精度高、自诊断等功能。

3. 传感器智能化、多融合、网络化的发展趋势

近年来具有感知能力、计算能力、通信能力、协同能力的传感器应用日趋广泛，作为信息技术源头的传感器技术正朝着物联网的方向发展。

1）传感器智能化

智能传感器（Intelligent Sensor/Smart Sensor）就是将传感器获取信息的基本功能，与微处理器信息分析和处理的功能紧密结合在一起，对传感器采集的数据进行处理，使其采集的数据最佳。智能传感器由多个模块组成，其中包括微传感器、微处理器、微执行器、接口电路等。它们构成一个闭环微系统，通过数字接口与更高一级的计算机控制系统相连，利用在专家系统中得到的算法，对微传感器提供更好的校正和补偿。

2）多传感器融合

多传感器融合是指多个传感器集成与融合的技术。单个传感器不可避免地存在不确定性或偶然不确定性，缺乏全面性和健状性，多个传感器融合正是解决这些问题的良方。多个传感器集成与融合最早用于美国的军事领域，如今已扩展到自动目标识别、自主车辆导航、遥感、生产过程监控、机器人、医疗等方面，已经成为新一代智能信息技术的基础。

3）传感器网络化

传感器网络化是由传感器技术、计算机技术和通信技术相结合而发展起来的。传感器网络是由众多随机分布的同类或异类传感器节点与网关节点构成的无线网络，具有微型化、智能化和集群化的特点，可实现目标数据和环境信息的采集和处理，可在节点与节点之间、节点与外界之间进行通信。每个传感器节点都集成了传感、处理和通信的功能，根据需要密布于目标对象的监测部位，进行分散式巡视、测量和集中管理。

当代科学技术发展的一个显著特征是，各个学科在其前沿边缘上相互渗透、相互融合，从而催生出新的学科或新的技术。传感器也不例外，它正在不断与其他学科的高技术相融合，孕育出新的技术，并推动着各个领域技术的进步。传感器网络化必将为信息技术的发展带来新的动力和活力，终极目标是实现物联网。

2.2 传感器的应用

传感器在原理和结构上千差万别。传感器的工作原理不同，传感器的功能和应用领域也就不同。本节介绍典型传感器的工作原理与应用。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2.2.1 应变式传感器

应变式传感器具有悠久的历史，是应用最广泛的传感器之一。这里介绍的是金属电阻应变式传感器，这是一种电阻式传感器。金属电阻应变式传感器的基本原理是，将“被测量”的变化转换成电阻值的变化，再将电阻值的变化转变成电压的变化。基于电阻变化的传感器十分常见，这是因为许多物理量（如力、力矩、位移、形变、速度、加速度等）都会对材料的电阻产生影响。金属电阻应变式传感器结构简单、性能稳定、灵敏度高、使用方便、测量速度快，适合静态测量和动态测量。

1. 应变式传感器的工作原理

应变式传感器的核心元件是金属应变片，这种传感器将金属应变片粘在各种弹性敏感元件上，当弹性敏感元件在外界载荷的作用下变形时，金属应变片的电阻值将发生变化，这样就构成了金属电阻应变式传感器。金属应变片的基本构造如图 2-5 所示，一般由电阻丝式敏感栅、基片、引线、覆盖层等组成。电阻丝式敏感栅为金属栅，实际上是一个电阻元件，与基片黏合在一起，由直径为 0.01～0.05mm、高电阻系数的细丝弯曲而成，是感受应变的敏感部分。基片的作用是保证将构件上的应变准确地传递到敏感栅上，因此它必须很薄，厚度一般为 0.03～0.06mm。基片应有良好的绝缘性能、抗潮性能和耐热性能，基片的材料有纸、胶膜、玻璃纤维布等。覆盖层要保持敏感栅、引线的形状和相对位置。引线的作用是将敏感栅电阻元件与测量电路相连接，一般由直径为 0.1～0.2mm 的低阻镀锡铜丝制成。

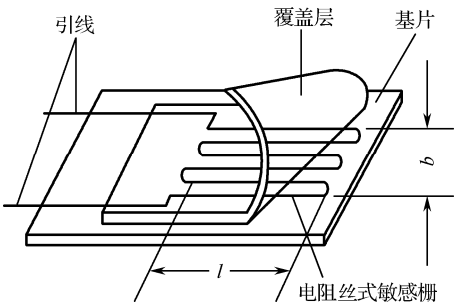
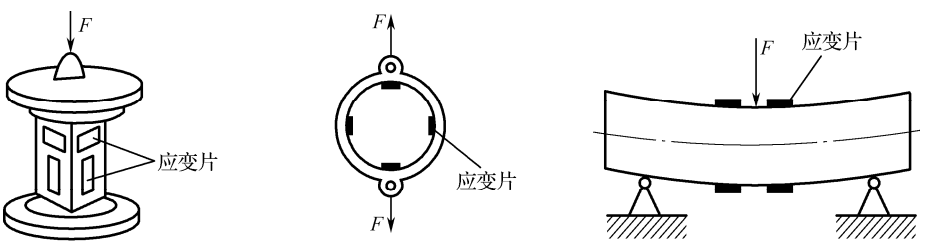


图 2-5 金属应变片的基本构造

在测试时，将应变片粘在被测试件的表面上，如图 2-6 所示。随着试件受力变形，应变片的敏感栅也获得同样的变形，使应变片敏感栅的电阻随之发生变化。再通过一定的测量电路，将电阻的变化转换为电压的变化，即可测试应变量的大小。



（a）柱式　（b）环式　（c）膜片式

图 2-6 测量电路中的金属应变片

2. 典型的应变式传感器

常用的应变式传感器有应变式测力传感器、应变式压力传感器、应变式扭矩传感器、应变式位移传感器、应变式加速度传感器、应变式测温传感器等。下面举例说明典型的应变式

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

传感器。

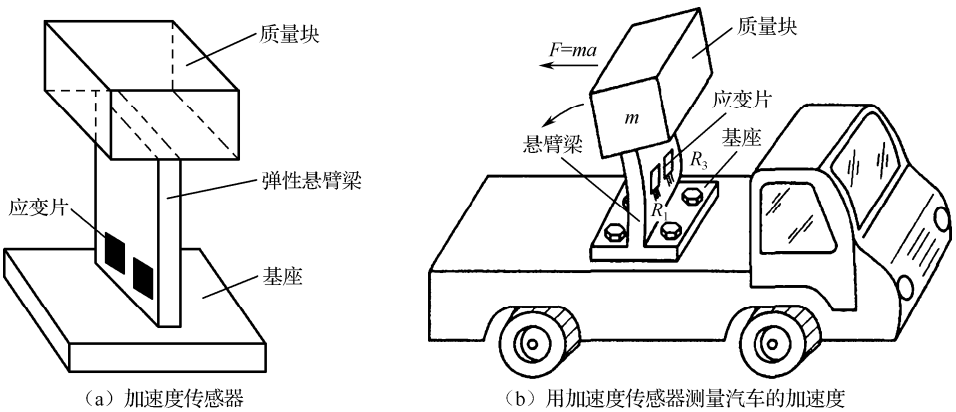
1）应变式压力传感器

应变式压力传感器是将被测压力转换为相应电阻值变化的传感器。应变式压力传感器体积小，商品化的应变片有多种规格可供选择，而且可以灵活设计弹性敏感元件的形状，能适应各种应用场合。3 种应变式压力传感器如图 2-7 所示。

图 2-7　3 种应变式压力传感器

2）应变式加速度传感器

物体运动的加速度与作用在它上面的力成正比，与物体的质量成反比。测量时，将传感器与被测物刚性连接，当被测物加速运动时，传感器受到一个与加速度方向相反的惯性力作用，传感器上的应变片就产生应变。梁式结构的应变式加速度传感器及其应用如图 2-8 所示。



（a）加速度传感器　　（b）用加速度传感器测量汽车的加速度

图 2-8　梁式结构的应变式加速度传感器及其应用

3. 应变式传感器的特点

1）应变式传感器的优点

- 精度高，能测量极微小的应变；
- 误差较小，一般小于 1%；
- 测量范围大，从弹性变形一直可测至塑性变形；
- 既可测静态应变力，也可测快速交变应力；
- 能在各种严酷环境中工作，例如，从宇宙真空至数千个大气压的环境，从接近绝对零度低温至近 1000℃高温的环境，以及振动、磁场、放射性环境等；
- 尺寸小，重量轻，价格低廉，品种多样，便于选择和大量使用。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2）应变式传感器的缺点

大应变有较大的非线性，输出信号较弱，这时需要采取一定的补偿措施。

2.2.2 光电式传感器

光电式传感器是以光为测量媒介、以光电器件为转换元件的传感器。近年来，各种新型光电器件不断涌现，光电式传感器已经成为传感器领域的重要角色，在非接触测量领域更是占据绝对的统治地位。由于光电测量方法灵活多样，可测参数众多，具有非接触、高精度、高可靠性、反应快等特点，使得光电式传感器在检测和控制领域获得了广泛的应用。

1. 光电式传感器的组成

光电式传感器首先把“被测量”的变化转换成光信号的变化，然后借助光电器件进一步将光信号转换成电信号。光电式传感器一般由光源、光通路、光电器件和测量电路组成，如图 2-9 所示。“被测量”引起光变化的方式和途径有两种：一种是被测量（x_1）直接引起光源的变化（强弱或有无）；另一种是被测量（x_2）对光通路产生作用，引起到达光电器件的光的变化。光电器件是光电式传感器的核心部件，负责将光信号转换成电信号。测量电路主要用来对光电器件输出的电信号进行处理和放大。

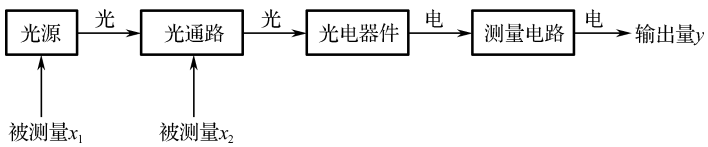


图 2-9 光电式传感器的组成

2. 光电式传感器的分类

有什么样的光电器件，就有什么样的光电式传感器，因此光电式传感器的种类繁多。

1）光电效应传感器

光电效应是指物体吸收光能后，转换为该物体中某些电子的能量而产生的电效应。最早的光电转换元件主要是利用光电效应制成的。光电效应分为外光电效应和内光电效应，光电器件也随之分为外光电器件和内光电器件。基于光电效应的传感器称为光电效应传感器。

（1）外光电效应。

在光线作用下，能使电子逸出物体表面的现象称为外光电效应。著名的爱因斯坦光电效应方程描述了这一物理现象，现在的光电管、光电倍增管就属于这类光电器件。

（2）内光电效应。

当光照射在物体上时，物体的电阻率会发生变化，或产生光生电动势，这种现象多发生在半导体内部，称为内光电效应。内光电效应分为光电导效应和光生伏特效应两大类：引起材料电阻率变化的效应称为光电导效应，光敏电阻就属于这类光电器件；使物体产生一定方向电动势的现象称为光生伏特效应，光电池、光敏晶体管就属于这类光电器件。

2）固态图像传感器

固态图像传感器根据元件的不同，可分为 CCD（Charge Coupled Device）和 CMOS

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

（Complementary Metal-Oxide Semiconductor）两大类。其中，CCD 由贝尔实验室于 1970 年发明，能将光学影像转换成数字信号，这项技术于 2009 年获诺贝尔奖。

3）红外传感器

红外传感器是利用红外线的物理性质进行测量的传感器。红外传感器按探测机理可分为热探测器和光子探测器，按功能可分为辐射计、搜索跟踪系统、热成像系统、红外测距通信系统和混合系统。红外传感器广泛用于现代科技、国防、工农业等领域。

4）光纤传感器

光纤的最初研究是为了通信，光纤传感技术是伴随着光通信技术的发展而逐步形成的。光纤传感器利用“被测量”的变化调制光纤中光波的偏振、光强、相位、频率或波长，然后经过光探测器及解调，便可获得需要检测的信息。光纤传感器测量对象广泛，环境适应性好，便于组网，结构简单，成本低，灵敏度高，发展前景非常广阔。

3. 典型的光电式传感器

光电式传感器可用于检测直接引起光量变化的非电量，如光强、光照度、辐射测温等。光电式传感器也可以用来检测能转换成光量变化的其他非电量，如零件直径、表面粗糙度、应变、位移、速度、加速度、物体形状等。下面举例说明典型的光电式传感器。

1）光敏电阻

为了消除工业烟尘污染，首先要知道烟尘排放量，因此必须对烟尘源进行监测、自动显示和超标报警。烟道里的烟尘浊度可以通过烟道里传输的光的变化来检测，如果烟道浊度增加，光源发出的光被烟尘颗粒吸收及折射增加，到达光检测器的光就会减少，由此可以对烟尘浊度进行监测。烟尘浊度监测的工作原理如图 2-10 所示。

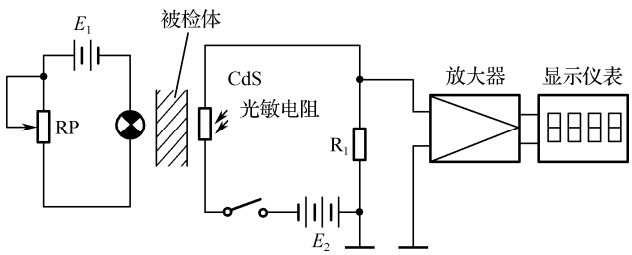


图 2-10　烟尘浊度监测的工作原理

在图 2-10 中，烟尘浊度监测采用了光敏电阻。光敏电阻是利用半导体材料的光电效应制成的，阻值随入射光线的强弱变化而变化。在黑暗条件下，阻值可达 10MΩ；在强光条件下，阻值仅有几百至数千欧姆。设计光控电路时，都用白炽灯泡或自然光作为控制光源，设计十分简便。光敏电阻如图 2-11 所示。

2）CCD 图像传感器

电荷耦合器件（Charge Coupled Device）也被称为 CCD 图像传感器，目前这项技术广泛应用在摄像机、数码相机、扫描仪、光学遥测、天文学等领域。它是一种半导体器件，能够把光学影像转换为数字信号。CCD 图像传感器上植入的微小光敏物质称为像素，像素越多，其提供的画面分辨率也就越高。CCD 图像传感器可以实现图像的获取、存储、传输、处理和复现，其显著特点是体积小、重量轻、功耗小、抗冲击、寿命长、灵敏度高、噪声低、动态

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

范围大、响应速度快，可应用于超大规模集成电路工艺技术生产，商品化生产成本低。CCD图像传感器如图 2-12 所示。

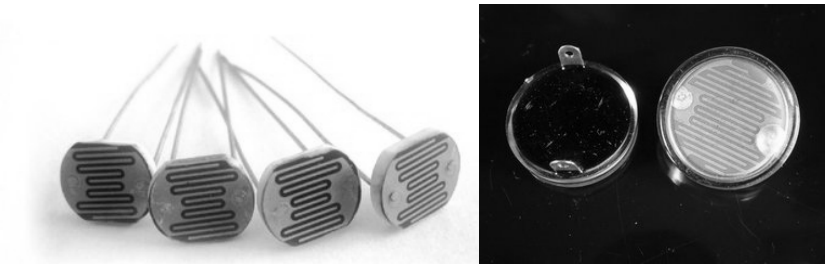


图 2-11 光敏电阻

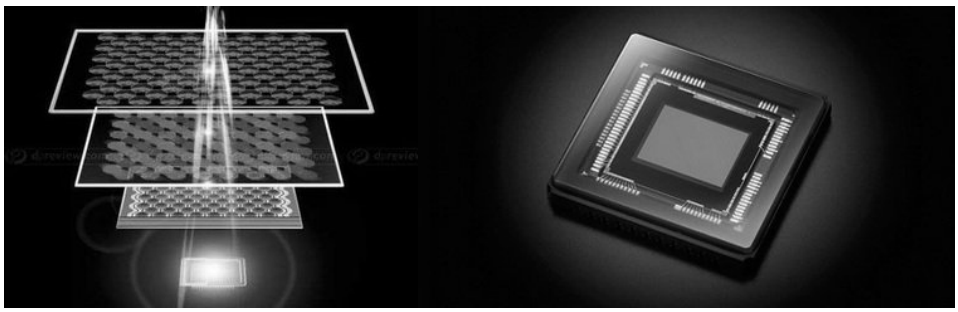


图 2-12 CCD 图像传感器

3）红外探测器

红外线具有热效应，基于热效应的探测机理可以构成红外探测器。红外探测器可用于红外辐射计、红外搜索跟踪系统、红外热成像系统等。红外辐射计用于辐射和光谱的测量，可测量火焰的温度，可通过探测人体发出的红外线自动报警，可通过对红外线的选择性吸收进行气体浓度分析。红外搜索跟踪系统的典型应用是响尾蛇导弹，美国的响尾蛇导弹是世界上第一种空对空导弹。红外热成像系统可探测目标物体的红外辐射，利用目标和背景之间的红外辐射差，可以得到不同的红外图像，红外摄像机如图 2-13 所示。

图 2-13 红外摄像机

4）光纤传感器

光纤虽然比头发丝还细，却具有把光封闭在其中并沿轴向传播的特性。光纤由纤芯、包层、涂覆层和护套构成，如图 2-14 所示。

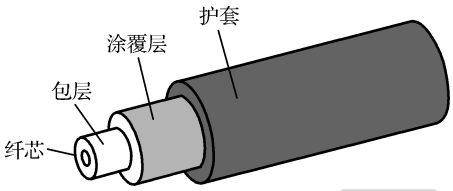
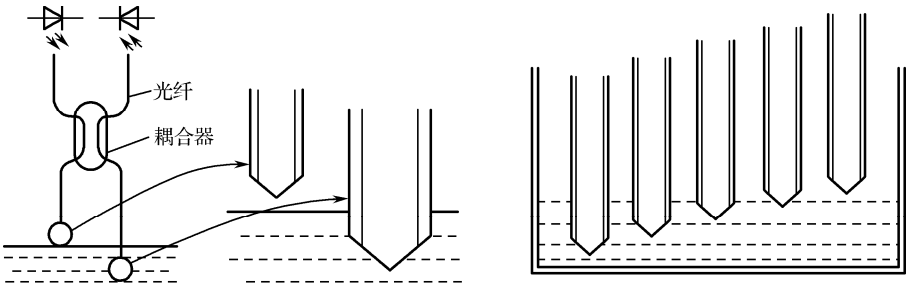


图 2-14 光纤的构成

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

光纤传感器利用光纤在外界因素作用下的光学特性（光强、相位、频率、偏振等）变化实现传感器的功能。光纤液位传感器示意图如图 2-15 所示，当光纤接触液体时，利用液体的折射率比空气大来监测液位的变化。光纤压力传感器示意图如图 2-16 所示，当光纤弯曲时，在纤芯中传输的光有一部分散射到包层中，以此实现对力、位移、压强等的测量。



（a）探头结构和工作原理　　（b）连续监测液位的变化

图 2-15　光纤液位传感器示意图

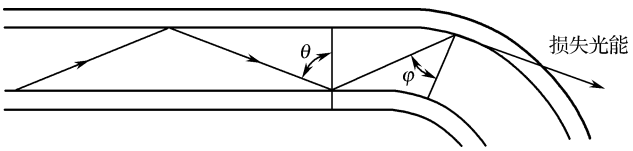


图 2-16　光纤压力传感器示意图

4. 光电式传感器的优点

1）可实现非接触检测

无须机械性接触，即可实现物体的检测，不会对被检测的物体和传感器造成损伤。检测距离可以达到 10m 以上，这是其他传感器不易达到的。

2）对检测物体的限制少

由于以检测物体引起的遮光和反射为检测原理，所以可对玻璃、塑料、木材、液体、金属等几乎所有物体进行检测。

3）响应时间短

光传输为高速传输，并且传感器的电路都是由电子元器件构成的，响应时间非常短。

4）分辨率高

通过设计能使投光光束集中在一个小光点，或通过构成特殊的受光光学系统来实现高分辨率，可以进行微小物体的检测和高精度的位置检测。

5）可实现颜色判别

根据被投光的光线波长和被检测物体的颜色组合的不同，光的反射率和吸收率有所差异。利用这种性质，可以检测物体的颜色。

6）便于调整

在光的投射类型中，投光光束是眼睛可见的，便于对被检测物体的位置进行调整。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2.2.3 超声波传感器

超声波是一种振动频率高于声波的机械波，具有频率高、波长短、绕射现象小、方向性好、能够定向传播等特点。超声波传感器是利用超声波的特性研制而成的传感器，对液体、固体的穿透能力很大，在不透明的固体中尤其适用，可穿透几十米。超声波碰到杂质或分界面会产生显著的反射，碰到活动物体能产生多普勒效应，因此超声波传感器广泛应用在工业、国防、生物医学等多个领域。

1. 超声波传感器的工作原理

声音是由物体振动产生的。人们能听到的声音频率在 20Hz～20kHz，超过 20kHz 称为超声波，低于 20Hz 称为次声波。

超声波是一种在弹性介质中的机械振荡，有横向振荡（横波）及纵向振荡（纵波）两种形式，在工业应用中主要采用纵向振荡。超声波可以在气体、液体及固体中传播，传播中也有折射和反射现象，并在传播过程中有衰减。超声波在空气中衰减较快，而在液体及固体中衰减较慢、传播较远。利用超声波的上述特性，可以做成各种超声传感器，超声波传感器的工作原理如图 2-17 所示。

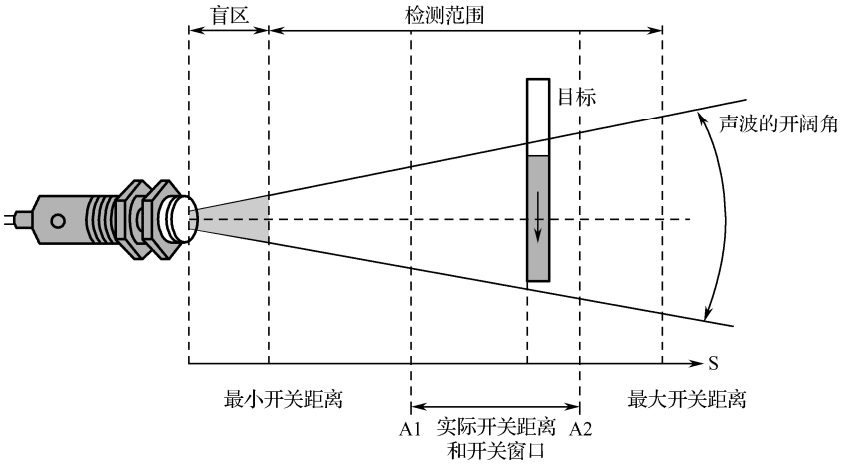


图 2-17 超声波传感器的工作原理

超声波传感器由发送传感器、接收传感器、控制部分和电源部分组成。发送传感器由发送器及换能器组成，其中换能器的作用是将陶瓷振子的电振动能量转换成超声波能量向空中辐射。接收传感器由换能器与放大电路组成，其中换能器接收超声波的机械振动，并将其变换成电能量。控制部分主要对发送器发出的脉冲频率、占空比、稀疏调制、计数及探测距离等进行控制。超声波传感器的电源一般可用 DC 12V 或 DC 24V 等。

2. 典型的超声波传感器

超声波应用有 3 种基本类型：透射型主要应用于遥控器、防盗报警器、自动门等，分离式反射型主要用于测距、测液位等，反射型主要用于材料探伤、测厚等。超声波传感器现已

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

广泛应用于工业、国防、生物医学等多个领域。

1）超声波在医学上的应用

超声波传感技术在医学方面的应用是其最主要的应用之一。超声波在医学上的应用主要是诊断疾病，它已经成为临床医学中不可缺少的诊断方法。超声波诊断最有代表性的方法是利用超声波的反射，当超声波在人体组织中遇到两种不同介质的分界面时，就会产生反射回声。每遇到一个反射面时，就会在示波器的屏幕上显示出回声，这些部位就可能产生了病变。超声波在医学上的应用如图 2-18 所示。超声波诊断的优点是显像清晰，诊断准确率高，受检者无痛苦、无损害。

图 2-18　超声波在医学上的应用

2）超声波在工业方面的应用

在工业方面，超声波的典型应用是对金属的无损探伤和超声波测厚。将超声波传感器固定安装在不同的装置上，利用超声波的反射可以“悄无声息”地探测材料内部的创伤和材料的厚度。超声波在工业上的应用如图 2-19 所示。

图 2-19　超声波在工业上的应用

3. 超声波传感器的优点

1）可以探测到物体（或组织）的内部

过去许多技术因为无法探测到物体或组织的内部而使应用受阻，超声波传感技术的出现改变了这种状况。以医疗为例，超声波可以检查人体的健康情况，对受检者无任何伤害。

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2）探测深度大

超声波对液体、固体的穿透能力很大，尤其是在固体中，可穿透几十米。

3）探测范围广

超声波传感器对透明或有色物体，金属或非金属物体，固体、液体、粉状物质均能检测。

4）能工作在各种环境中

超声波传感器的检测性能几乎不受任何环境条件的影响。超声波传感器不怕电磁干扰，不怕烟尘环境和雨天，不怕酸碱等强腐蚀性液体，性能稳定、可靠性高、寿命长。

5）无接触探测

超声波传感器利用声波介质对被检测物进行探测，是非接触式无磨损的检测。

6）测量速度快

超声波传感器的响应时间短，可以方便地实现无滞后的实时测量。

2.2.4 半导体传感器

半导体传感器是利用半导体材料的各种特性制成的传感器。半导体传感器利用了近百种效应和材料特性，种类繁多。半导体传感器所采用的半导体材料多数是硅及其化合物，优点是灵敏度高、响应速度快、体积小、重量轻，便于集成化、智能化，能使检测与转换一体化。

1. 半导体传感器的工作原理

半导体传感器按输入信息分为物理敏感半导体传感器、化学敏感半导体传感器和生物敏感半导体传感器。物理敏感半导体传感器是将物理量转换成电信号的器件，按敏感对象分为光敏、热敏、力敏、磁敏等不同的类型。化学敏感半导体传感器是将化学量转换成电信号的器件，按敏感对象分为对气体、湿度、离子等敏感的类型，利用的化学效应有氧化还原反应、光化学反应、离子交换反应、催化反应、电化学反应等。生物敏感半导体传感器是将生物量转换成电信号的器件，其往往利用膜的选择作用、酶的生化反应和免疫反应，通过测量反应生成物或消耗物的数量达到检测的目的。

2. 典型的半导体传感器

1）半导体压力传感器

对半导体材料施加一定的载荷而产生应力时，它的电阻率会发生变化，这种物理现象称为半导体的压阻效应。压阻式压力传感器是基于半导体材料的压阻效应而制成的。半导体材料的压阻效应显著，半导体应变片的灵敏系数比金属应变片大得多。半导体应变片如图 2-20 所示。半导体压力传感器如图 2-21 所示。

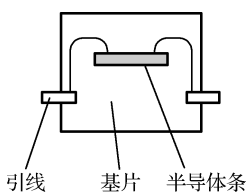


图 2-20 半导体应变片

图 2-21 半导体压力传感器

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

压阻式压力传感器广泛应用于流体压力、差压、液位的测量，如图 2-22 所示，在半导体应变片的上部是低压腔（通常与大气相通），下部是与被测系统相连的高压腔，在被测压力 p_2 的作用下，半导体应变片产生应力和应变，半导体应变片的电阻值也发生相应的变化。压阻式压力传感器还可以微型化，已有直径为 0.8mm 的压力传感器，在生物医学上可以测量血管内压、颅内压等。

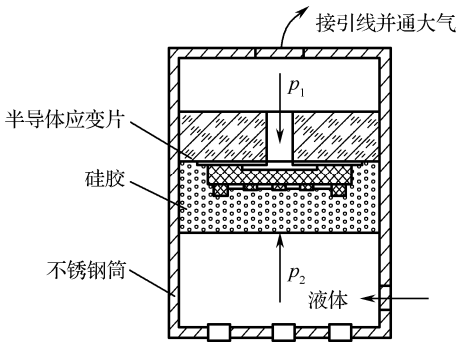


图 2-22　压阻式压力传感器

2）半导体温度传感器

半导体温度传感器是用来测量环境温度的传感器。半导体温度传感器分为接触型和非接触型两大类，其中接触型又分为热敏电阻与 PN 结型温度传感器。半导体载流子的浓度与温度有关，当温度变化时，半导体感温器件的电阻会发生较大的变化，这种器件称为热敏电阻，最常见的热敏电阻是由金属氧化物半导体材料制成的。PN 结型温度传感器是一种利用半导体二极管、三极管的特性与温度的依赖关系制成的温度传感器。非接触型温度传感器可检出被测物体发射的电磁波能量。

热敏电阻是一种用半导体材料制成的感温元件，其灵敏度比金属热电阻高得多，而且体积可以做得很小，特别适于在−100～300℃范围内测温。热敏电阻主要由电阻体、壳体和引线构成，如图 2-23 所示。半导体温度传感器如图 2-24 所示。

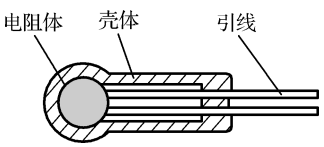


图 2-23　热敏电阻

图 2-24　半导体温度传感器

热敏电阻不仅可以测量温度，还可以利用热敏电阻上的热量消耗和介质流速的关系测量流量、流速、风速等。图 2-25 所示为热敏电阻式流量计的电路原理图，热敏电阻 R_{t1} 和 R_{t2} 分别置于管道中央和不受介质流速影响的小室中。当介质处于静止状态时，R_{t1} 和 R_{t2} 的电阻值相等，电桥输出为 0；当介质流动时，将 R_{t1} 的热量带走，致使 R_{t1} 的阻值变化，电桥有输出。介质从 R_{t1} 上带走的热量与介质的流量（流速）有关，故可用它测量流量（流速）。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

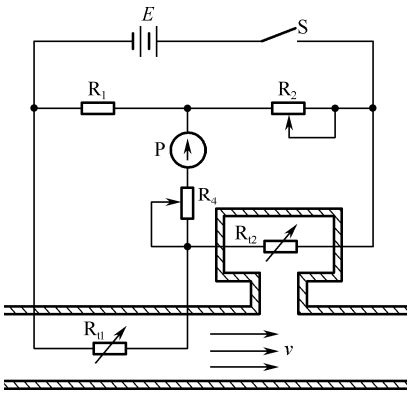


图 2-25　热敏电阻式流量计的电路原理图

3）半导体气敏传感器

气敏传感器涉及化学物质的检测原理，即涉及敏感材料和被检测气体的相互作用。半导体气敏传感器是用来测量气体的类别、浓度和成分的传感器，主要用于可燃气体防爆报警器、有毒气体监测器、气体浓度定量监测器等，在防灾、环境保护、节能、工程管理、自动控制等方面有广泛的应用。

半导体气敏传感器分为电阻式与非电阻式两种类型。电阻式采用金属氧化物材料制备，有多孔烧结件、厚膜、薄膜等形式，其中薄膜型气敏器件的结构如图 2-26 所示。这类传感器利用气体在半导体表面的氧化还原反应，可检测甲烷、丙烷、氢气、一氧化碳等还原性气体，以及氧气、二氧化氮等氧化性气体。非电阻式气体传感器利用气体吸附和反应时引起的功函数变化检测气体，可分为 MOS 二极管型传感器和 MOSFET 型传感器等。半导体气敏传感器如图 2-27 所示。

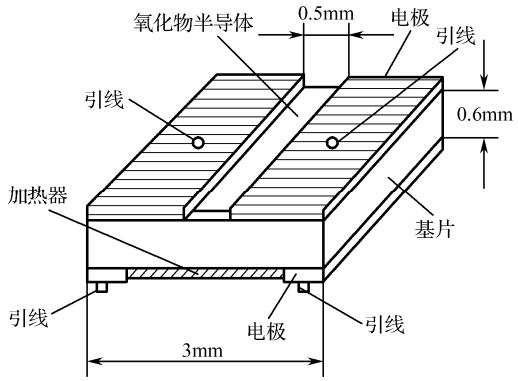


图 2-26　薄膜型气敏器件的结构

图 2-27　半导体气敏传感器

4）半导体湿敏传感器

湿度是指大气中水蒸气的含量，通常采用绝对湿度和相对湿度两种方法来表示。利用水分子易于吸附在固体表面并渗透到固体内部的特性，可以制成湿敏传感器。

半导体陶瓷湿敏传感器通常采用由两种以上的金属氧化物半导体材料混合烧结而成的多孔陶瓷，其电阻率随湿度的变化而变化，能连续、稳定地测量湿度。由铬酸镁–二氧化钛

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

（$MgCr_2O_4$-TiO_2）组成的多孔性半导体陶瓷是性能较好的湿敏材料，其结构如图 2-28 所示。半导体湿敏传感器如图 2-29 所示。

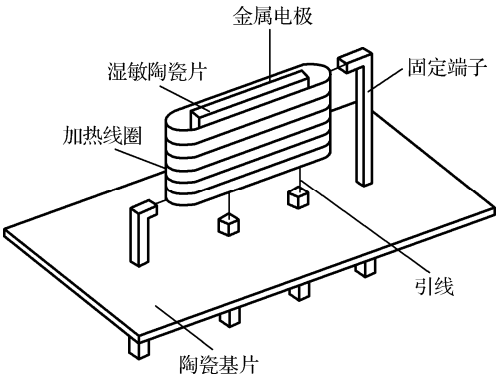


图 2-28　多孔性半导体陶瓷结构

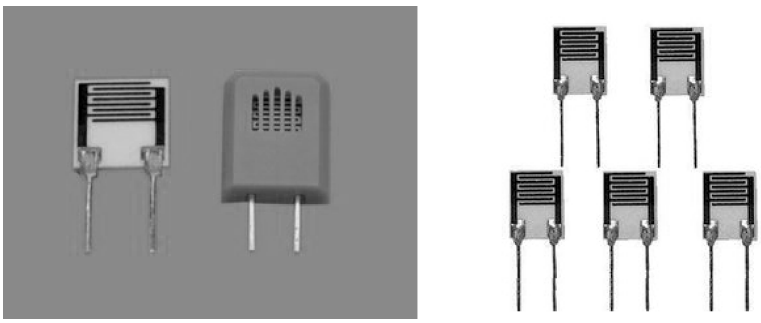


图 2-29　半导体湿敏传感器

3. 半导体传感器的优点

1）种类繁多

可以利用各种物理、化学和生物特性制成传感器，种类繁多。

2）响应时间短

半导体传感器的电路都是由电子元器件构成的，不包含机械性工作时间，响应时间非常短。

3）体积小、重量轻

半导体传感器都是由半导体材料制成的，体积小、重量轻。

4）检测、转换一体化

传感器一般由敏感元件、转换元件和转换电路组成，半导体传感器基本是将敏感元件和转换元件合二为一，便于集成化、智能化，能使检测、转换一体化。

5）应用广

半导体传感器具有类似于人类眼、耳、鼻、舌、皮肤等多种感觉器官的功能，广泛应用于工业自动化、遥测、家用电器、环境污染监测、医药工程和生物工程等多个领域。

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2.2.5 生物传感器

用固定化生物成分或生物体作为敏感元件的传感器称为生物传感器（Biosensor），生物传感器对酶、抗体、抗原、微生物、细胞、组织、核酸等敏感。

1. 生物传感器的工作原理

生物传感器的工作原理如图 2-30 所示，在生物功能膜上（或膜中）附着有生物传感器的敏感物质。被测量溶液中待测定的物质经扩散进入生物敏感膜层，有选择地吸附于敏感物质上，形成复合体，产生分子识别或生物学反应。这种变化所产生的信息可通过相应的化学或物理原理转换成电信号输出。

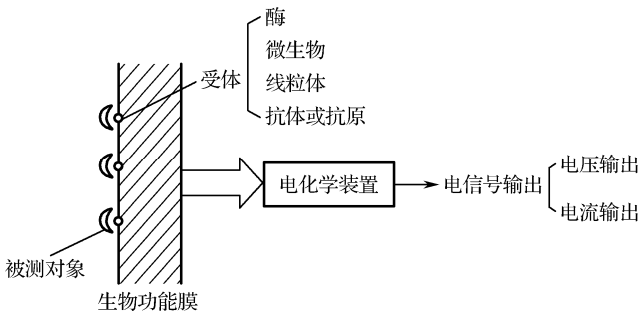


图 2-30 生物传感器的工作原理

2. 典型的生物传感器

生物传感器由分子识别部分（敏感物质）和转换部分（换能器）构成。分子识别部分是生物传感器选择性测定的基础，在生物体中能够分辨特定物质的抗体、组织、细胞等。换能器把生物活性表达的信号转换为电信号。人们应根据敏感元件所引起的化学变化或物理变化选择换能器。生物传感器根据换能器可分为生物电极传感器、半导体生物传感器、光生物传感器、热生物传感器、压电晶体生物传感器等。生物传感器如图 2-31 所示。

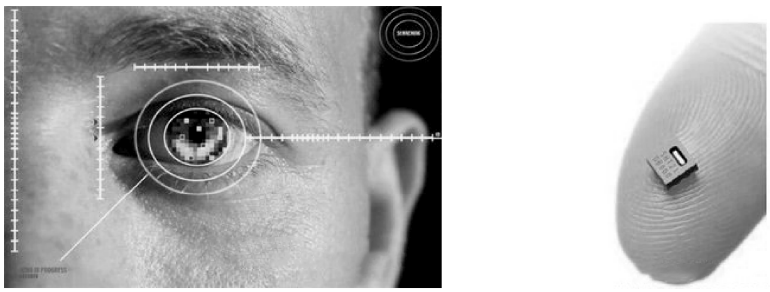


图 2-31 生物传感器

1967 年，S • J • 乌普迪克等研制出了第一个生物传感器——葡萄糖传感器。到目前为止，生物传感器大约经历了三个发展阶段。在第一个阶段，生物传感器由固定了生物成分的非活性基质膜和电化学电极组成，如葡萄糖氧化酶固定化膜和氧电极组装在一起构成的葡萄糖传

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

感器。在第二个阶段，生物传感器将生物成分直接吸附到转换器表面，无须非活性的基质膜。在第三个阶段，生物传感器将生物成分直接固定在电子元件上，把生物感知和信号转换处理结合在一起。生物传感器目前仍处于开发阶段，现实生活中对生物传感器的需求十分迫切。

3. 生物传感器的特点

生物传感器是由生物、化学、物理、医学、电子技术等多种学科互相渗透而发展起来的高新技术，因其具有选择性好、灵敏度高、分析速度快、成本低、可在复杂的体系中在线连续监测等特点，在近几十年获得蓬勃而迅速的发展。

生物传感器在制药、临床检验、生物医学、食品、化工、环境监测等方面有广泛的应用前景。生物传感器具有微型化与集成化的特点，特别是分子生物学与微电子学、光电子学、微细加工技术及纳米技术等新学科、新技术结合，正改变着传统医学、环境科学、动植物学的面貌，其研究开发已成为世界科技发展的新热点。

2.2.6 传感器集成化、智能化和网络化

传感器技术一个里程碑式的发展是 20 世纪 60 年代出现的硅传感器技术。硅传感器结合了硅材料优良的机械性能和电学性能，其制造工艺与微电子集成工艺相容，使传感器技术开始向微型化、集成化、智能化和网络化的方向迅速发展。

1. 传感器集成化

以硅传感器为主的微机电系统（Micro-Electro-Mechanical Systems，MEMS）近 20 年来发展非常迅速。MEMS 是由微传感器、微执行器、信号处理和控制电路、通信接口和电源等部件组成的一体化的微型器件系统。由 MEMS 技术制作的微传感器采用与集成电路类似的生成技术，尺寸非常小，典型尺寸在μm 级。MEMS 涉及微电子、材料、力学、化学、机械学、光学、医学、生物工程等诸多学科，是典型的多学科交叉的研究领域。

1）微传感器的材料

微传感器敏感结构采用的材料主要是硅。硅是用来制造集成电路的主要材料，在电子工业中已经有许多“硅制造极小结构”的经验，同时硅也是传感器使用的主要敏感材料。微传感器采用的硅材料包括单晶硅、多晶硅、非晶硅、蓝宝石、碳化硅等。

2）微传感器的加工工艺

微传感器的微细加工尺寸一般在μm 级，传统的机械加工将无能为力。微传感器微细加工技术的核心是制成层与层之间差别较大的微小的三维敏感结构。微传感器的加工工艺是在硅集成电路工艺基础上发展起来的，加工工艺主要有光刻技术、蚀刻技术、薄膜技术、键合技术、半导体掺杂和 LIGA（光刻、电铸和注塑）技术等，能批量生产微型传感器。

3）集成传感器实例——硅电容式微机械陀螺

陀螺是一种测量角度或角速度的仪器。传统的陀螺体积大、价格高；以 MEMS 技术为基础的微机械陀螺体积小、价格低、易于批量生产，越来越受到人们的重视。

一种硅电容式微机械陀螺的结构示意图如图 2-32 所示，它的平面外轮廓尺寸为 1mm×1mm，厚度为 2μm。它利用一种对称结构将敏感质量块支撑在连接梁上，通过支撑梁与驱动电极和敏感电极连接在一起。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

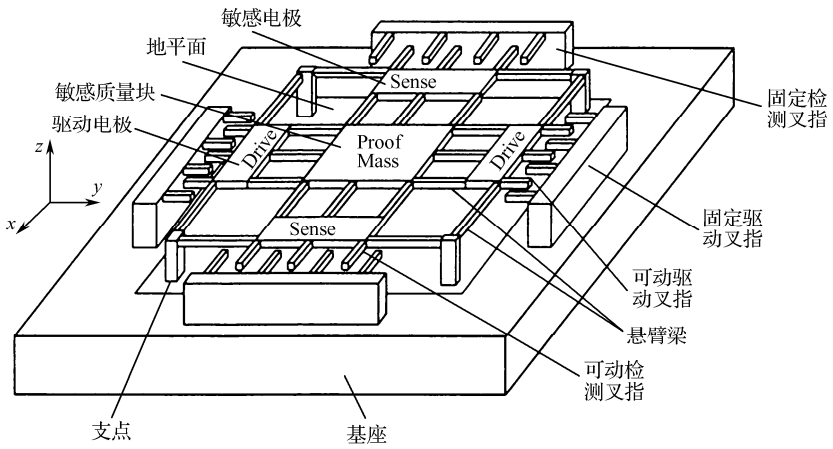


图 2-32 一种硅电容式微机械陀螺的结构示意图

微机械陀螺的工作原理基于柯氏效应，利用柯氏力进行能量的传递，将谐振器的一种振动模式激励成另一种振动模式，后一种振动模式的振幅与输入角速度的大小成正比，通过测量后一种振动的振幅可实现对角速度的测量。工作时，在敏感质量块上施加直流偏置电压，在可动检测叉指和固定驱动叉指之间施加适当的交流激励电压，从而使敏感质量块产生沿 y 轴方向的固有振动。当陀螺感受到绕 z 轴的角速度时，由于柯氏效应，敏感质量块将产生沿 x 轴方向的附加振动，敏感电极通过测量附加振动的幅值，就可以得到被测的角速度。

2. 传感器智能化

智能传感器（Intelligent Sensor）不仅仅是一个简单的传感器，它带有微处理器，具有采集、处理和交换信息的能力，是集成化传感器与微处理器相结合的产物。

1）智能传感器的功能

（1）具有复合敏感功能，能够较全面地反映物体运动的规律。例如，美国加利福尼亚大学研制的复合液体传感器，可同时测量介质的温度、流速、压力和密度。

（2）能够完成信号探测、变换处理、逻辑判断、功能计算和双向通信。

（3）内部可实现自检、自校、自补偿、自诊断等部分或全部功能。

2）智能传感器的特点

（1）集成化。大规模集成电路的发展，使敏感元件、信号处理器和微控制器都集成到同一芯片上，成为集成智能传感器。

（2）微机械加工技术。智能传感器的制造基础是微机械加工技术，再采用不同的封装技术，近几年又发展了一种 LIGA 工艺用于制造传感器。

（3）软件。智能传感器对硬件性能的苛刻要求有所降低，而靠软件大幅度提高性能。智能传感器一般具有很强的实时性，动态测量可在几微秒内完成数据的采集、计算、处理和输出。智能传感器的一系列功能都是在程序支持下进行的，这些软件包括标度换算、数字调零、非线性补偿、温度补偿、数字滤波技术等。

（4）人工智能材料的应用。人工智能材料是继天然材料、人造材料和精细材料之后的第四代功能材料，它有三个基本特征：能感知条件环境的变化（传感器功能），进行自我判断（处

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

理器功能），发出指令或自行采取行动（执行器功能）。生物体是典型的人工智能材料。

3）智能传感器的构成

智能传感器是一个典型的以微处理器为核心的检测系统，如图 2-33 所示。集成化智能传感器采用微机械加工技术和大规模集成电路工艺，利用硅作为基本材料制作敏感元件、信号调理电路和微处理器单元，并将它们集成在一块芯片上。

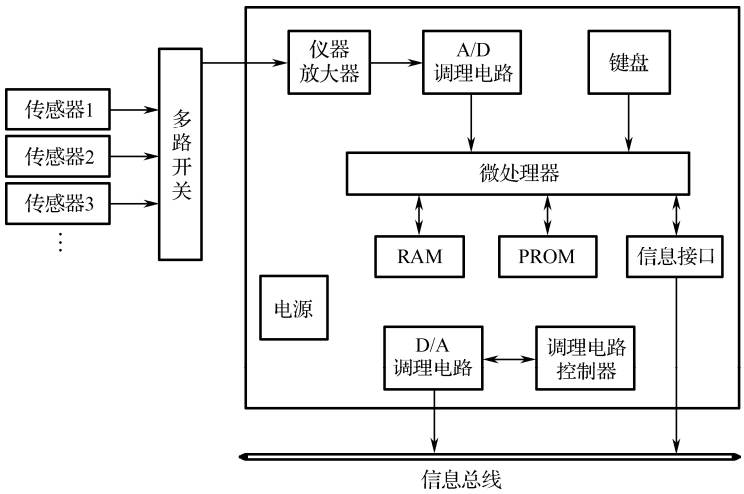
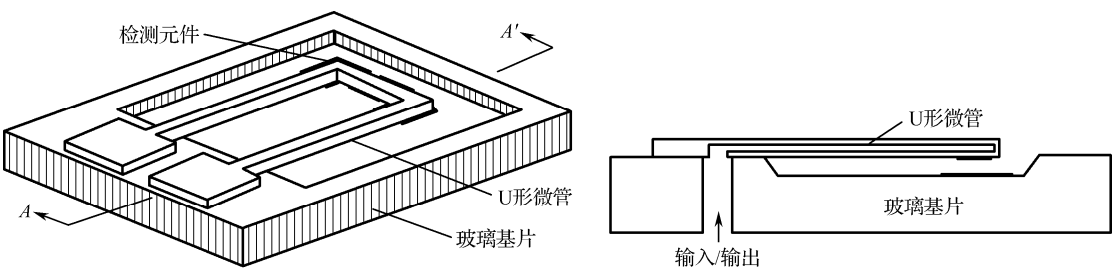


图 2-33　智能传感器

4）智能传感器实例——微机械质量流量传感器及其智能系统

基于柯氏效应的微机械质量流量传感器如图 2-34 所示，其中图 2-34（a）所示为三维视图，图 2-34（b）所示为 *AA'* 横截面图。该传感器的基本结构包括一个 U 形微管和玻璃基片，U 形微管的根部与玻璃基片键合在一起。当 U 形微管内流过流体时，由于柯氏效应，U 形微管产生关于中心对称轴的一阶扭转“副振动”，该“副振动”与流体的质量流量（kg/s）成比例，通过检测 U 形微管的“合成振动”，就可以得到流体的质量流量。



（a）三维视图　　（b）*AA'* 横截面图

图 2-34　基于柯氏效应的微机械质量流量传感器

智能质量流量传感器系统如图 2-35 所示。在流体的测量过程中，实时性要求越来越高，智能质量流量传感器系统以一定的解算模型对测量过程进行动态校正，从而提高了测量过程的实时性。在图 2-35 中，基于系统同时直接测得的流体的质量流量和密度，就可以实现对流体体积流量的同步解算；基于系统同时直接测得的流体的质量流量和体积流量，就可以实现

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

对流体质量数和体积数的累计计算，从而实现批量控制罐装的功能；基于直接测得的流体的密度，就可以实现对双组分流体（如油和水）各自质量流量、体积流量的测量，这在原油生产中有十分重要的价值。

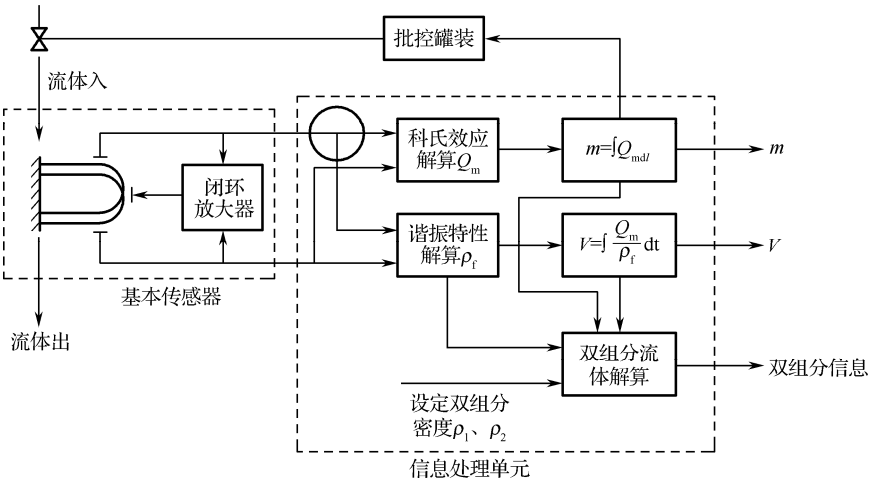


图 2-35 智能质量流量传感器系统

3. 传感器网络化

单独的传感器数据采集已经不能适应现代技术的发展，取而代之的是由分布式数据采集系统组成的传感器网络。传感器网络是由一组传感器以一定方式构成的网络，其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息。现在信息技术正朝着物联网的方向发展，传感器网络化是传感器发展的必由之路，也是网络向物体信息延伸的必由之路。

传感器网络的发展方向是从有线形式发展到无线形式，从现场总线形式发展到无线传感器网络形式，最终融入互联网，形成物联网。

（1）第一代传感器网络是由传统的传感器组成的测控系统。其出现在 20 世纪 70 年代，采用点对点传输的接口规范。这种系统曾经在测控领域中广泛应用，现在已逐渐淡出市场。

（2）第二代传感器网络是基于智能传感器的测控网络。20 世纪 80 年代，微处理器与传感器的结合，使传感器具有了计算能力，同时数据通信标准 RS—232、RS—422、RS—485 等也开始采用。但是，智能传感器与控制设备之间仍然采用传统的模拟电压或电流信号进行通信，没有从根本上解决布线复杂和抗干扰差的问题。

（3）第三代传感器网络是基于现场总线的智能传感器网络。20 世纪 80 年代末到 90 年代初，现场总线技术推出，将智能传感器的通信技术推进到一个新的阶段。现场总线利用数字通信代替了传统的模拟信号，是连接智能化现场设备和主控系统的全数字、开放式、双向通信网络。现场总线的种类较多，比较成功的例子有 CAN、Lonworks、Profibus、HART、FF 等，它们各有特点、各有不同领域的应用价值。但是，现场总线控制系统可认为是一个局部控制网络，只实现了某种现场总线的通信协议，还没有实现真正意义上的网络通信协议，也没有让智能传感器直接与计算机网络进行数据通信。

（4）第四代传感器网络是无线传感器网络。无线传感器网络的基本组成单位是节点，这

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

些节点集成了传感器、微处理器、无线接口和电源，以自组织和多跳的方式构成无线网络。无线传感器网络作为一种新型的网络技术，可以在任何时间和地点获取信息。

2.3 传感器选择的一般原则

如何选择传感器，是进行某个量的测量时首先要解决的问题。当传感器确定之后，与之配套的测量方法和测量设备也就确定了，测量的成败在很大程度上取决于传感器的选用是否合理。下面给出传感器选择的一般原则。

1. 确定传感器的类型

要进行具体的测量工作，首先要考虑采用何种原理的传感器，这需要分析多方面的因素才能确定。即使是测量同一物理量，也有多种原理的传感器可供选用，哪一种原理的传感器更为合适，需要根据被测量的特点和传感器的使用条件加以决定。

传感器的类型是选择传感器首先需要考虑的问题，在传感器的类型选择以后，才能选择传感器的性能指标。选择传感器的类型需要考虑下述问题。

（1）使用传统传感器还是智能传感器；

（2）被测位置对传感器体积的要求；

（3）测量方式为接触式还是非接触式；

（4）传感器是国产还是进口，价格能否承受，是否自行研制。

2. 灵敏度的选择

在传感器的线性范围内，通常希望传感器的灵敏度越高越好。因为灵敏度越高，与被测量变化对应的输出信号越容易检测，这有利于信号的处理。

但是需要注意的是，传感器的灵敏度越高，与被测量无关的外界噪声也越容易混入，噪声也会被放大系统放大，从而影响测量的精度。因此，一般还要求传感器具有较高的信噪比，尽量减少从外界引入的干扰信号。

传感器的灵敏度是有方向性的。当被测量是单向量，而且对方向性要求较高时，应选择反向灵敏度较小的传感器。如果被测量是多维向量，则要求传感器的交叉灵敏度越小越好。

3. 线性范围的选择

传感器的线性范围是指输入与输出成正比的范围。理论上讲，在线性范围内，灵敏度保持定值。传感器的线性范围越宽，量程就越大，并且能保证测量精度。在选择传感器时，当传感器的种类确定以后，首先要看其量程是否满足要求。

但实际上，任何传感器都不能保持绝对的线性。当所要求的测量精度比较低时，在一定范围内，可将非线性误差较小的传感器近似看成是线性的，这会给测量带来极大的方便。

4. 稳定性的选择

传感器使用一段时间后，其性能保持不变的能力称为稳定性。影响传感器长期稳定性的因素除传感器本身的结构外，主要是传感器的使用环境。因此，要使传感器具有良好的稳定

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

性，传感器必须具有较强的环境适应能力。

在选择传感器之前，应对传感器的使用环境进行调查，并根据具体的使用环境选择合适的传感器，或采取适当的措施减少环境的影响。传感器的稳定性有定量的指标，在超过使用期后，应重新进行标定，以确定传感器的性能是否发生变化。在某些要求传感器能长期使用、不能轻易更换或标定的场合，对传感器的稳定性应严格要求，使传感器能够经受住长时间的考验。

5. 精度的选择

精度是传感器的一个重要指标，关系到整个测量系统的测量准确性。传感器的精度越高，其价格越昂贵，因此传感器的精度只要满足整个测量系统的精度要求即可，不必选得过高，这样就可以在满足同一测量目的的诸多传感器中选择比较便宜和结构简单的传感器。

如果测量目的是定性分析，选用重复精度高的传感器即可，不宜选择绝对量值精度高的传感器。如果测量目的是定量分析，必须获得精确的测量值，则需要选择精度等级能满足要求的传感器。在某些特殊的场合，需要自行设计制作传感器，自制传感器的性能应满足精度要求。

思考与练习

1．什么是传感器？传感器是由哪几部分构成的？

2．传感器的作用是什么？简述传感器的分类方法。

3．传感器的一般特性是什么？简述传感器的灵敏度、迟滞、精度、线性度、重复性和漂移。

4．某位移传感器在位移变化 8mm 时，输出电压变化为 100mV，求该位移传感器的灵敏度。

5．某温度传感器的量程为−80～300℃，校验时最大绝对误差为 0.76℃，求该温度传感器的精度等级。

6．简述传感器的技术特点和发展趋势。

7．简述金属电阻应变式传感器的工作原理和特点，给出一个应变式传感器的应用实例。

8．什么是光电式传感器？光电效应传感器、CCD 图像传感器、红外探测器、光纤传感器的工作原理有什么不同？给出两个光电式传感器的应用实例。

9．简述超声波传感器的工作原理和特点，给出一个超声波传感器的应用实例。

10．利用半导体材料的什么特性可以分别制成压力传感器、温度传感器、气敏传感器、湿敏传感器？给出两个半导体传感器的应用实例。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

第3章

自动识别技术

【学习要求】

（1）掌握目前常用的自动识别技术，如生物识别技术、磁卡和 IC 卡识别技术、光学字符识别技术等。

（2）掌握条形码的识别原理及识别技术。

（3）掌握 RFID 的工作原理、RFID 系统的构成和工作过程。

（4）掌握 RFID 的关键技术特点。

3.1 自动识别技术概述

随着人类社会步入信息时代，人们所获取和处理的信息量不断增大。传统的信息采集输入是通过人工手段完成的，不仅劳动强度大，而且数据误码率高。以计算机和通信技术为基础的自动识别技术可以对信息进行自动识别，并可以工作在各种环境之下，使人类得以对大量数据信息进行及时、准确的处理。自动识别技术是物联网体系的重要组成部分，它可以对每个物品进行标识和识别，并可以将数据实时更新。

自动识别技术（Auto Identification and Data Capture，AIDC）是一种高度自动化的信息或数据采集技术，对字符、影像、条形码、声音、信号等记录数据的载体进行机器自动识别，自动地获取被识别物品的相关信息，并提供给后台的计算机处理系统以完成相关后续处理。

自动识别技术是用机器识别对象的众多技术的总称，具体地讲，就是应用识别装置，通过被识别物品与识别装置之间的接近活动，自动地获取被识别物体的相关信息。自动识别技术可以在制造、物流、防伪和安全等领域中应用，可以采用光识别、磁识别、电识别或射频识别等多种识别方式，是集计算机、光、电、通信和网络技术于一体的高技术学科。

完整的自动识别计算机管理系统包括自动识别系统（Auto Identification and Data System，AIDS）、应用程序接口（Application Interface，API）或中间件（Middleware）和应用系统软件（Application Software），如图 3-1 所示。其中，自动识别系统完成数据的采集和存储工作；应用系统软件对自动识别系统所采集的数据进行应用处理；而应用程序接口/中间件则提供自动识别系统和应用系统软件之间的通信接口（包括数据格式），将自动识别系统采集的数据信息转换成应用软件系统可以识别和利用的信息并进行数据传输。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

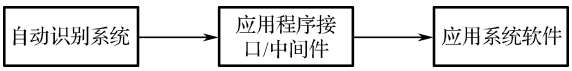


图 3-1 完整的自动识别计算机管理系统

自动识别技术的主要特征包括：准确性，自动采集数据，彻底消除人为错误；高效性，信息交换实时进行；兼容性，自动识别技术以计算机技术为基础，可与信息管理系统无缝连接。

自动识别技术根据识别对象的特征可以分为两大类，分别是数据采集技术和特征提取技术。这两大类自动识别技术的基本功能都是完成物品的自动识别和数据的自动采集。

数据采集技术要求被识别物体具有特定的识别特征载体（如标签等，光学字符识别例外），而特征提取技术则根据被识别物体本身的行为特征（包括静态、动态和属性特征）来完成数据的自动采集。自动识别技术的基本范畴见表 3-1。

表 3-1 自动识别技术的基本范畴

数据采集技术	特征提取技术
光存储器	静态特征
•条形码	•视觉识别
•矩阵码	•能量扰动识别
•光标读写器	动态特征
•光学字符识别（OCR）	•声音（语音）
磁存储器	•键盘敲击
•磁卡	•其他感觉特征
•非接触式磁卡	属性特征
•磁光存储	•化学感觉特征
•微波	•物理感觉特征
电存储器	•生物抗体病毒特征
•触摸式存储	•联合感觉系统
• RFID 射频识别（无芯片、有芯片）	
•存储卡（智能卡、非接触式智能卡）	

3.2 生物识别技术

3.2.1 生物识别技术概述

生物识别技术是指计算机利用人类自身生理或行为特征进行身份认定的一种技术，如指纹识别和虹膜识别等技术。据介绍，世界上某两个人指纹相同的概率极小，两个人的眼睛虹膜一模一样的情况也几乎没有，人的虹膜在两到三岁之后就不再发生变化，眼睛瞳孔周围的虹膜具有复杂的结构，能够成为独一无二的标识。与生活中的钥匙和密码相比，人的指纹或虹膜不易被修改、被盗或被人冒用，而且随时随地都可以使用。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

生物识别技术是依靠人体的身体特征来进行身份验证的一种解决方案，由于人体特征具有不可复制的特性，这一技术的安全系数较传统意义上的身份验证机制有很大的提高。

生物识别是用来识别个人的技术，它以数字测量所选择的某些人体特征，然后与这个人的档案资料中的相同特征做比较，这些档案资料可以存储在一个卡片或数据库中。被使用的人体特征包括指纹、声音、掌纹、手腕上和眼睛视网膜上的血管排列、眼球虹膜的图像、脸部特征、签字时和在键盘上打字时的动态。

指纹扫描器和掌纹测量仪是目前应用最广泛的生物识别设备。不管使用什么样的技术，操作方法都是通过测量人体特征来识别一个人。

生物识别技术适用于几乎所有需要进行安全性防范的场合，遍及诸多领域，在包括金融证券、IT、安全、公安、教育、海关等行业的许多应用系统中都具有广阔的应用前景。随着电子商务越来越广泛的应用，必须有更好的技术来实现身份认证。

3.2.2 生物识别技术的分类

生物特征分为生理特征和行为特征两类。生理特征包括指纹、掌形、眼睛（视网膜和虹膜）、人体气味、脸形、皮肤毛孔、手腕/手的血管纹理和 DNA 等。行为特征包括签名、语音、行走的步态、按键的力度等。

1. 基于生理特征的识别技术

1）指纹识别

指纹识别技术是通过取像设备读取指纹图像，然后用计算机识别软件分析指纹的全局特征和指纹的局部特征，特征点有脊、谷、终点、分叉点和分歧点等，从指纹中抽取特征值，从而非常可靠地通过指纹来确认一个人的身份。

指纹识别的优点表现在：研究历史较长，技术相对成熟；指纹图像提取设备小巧；同类产品中，指纹识别的成本较低。其缺点表现在：指纹识别是物理接触式的，具有侵犯性；指纹易磨损，手指太干或太湿都不易提取图像。

2）虹膜识别

虹膜识别技术是利用虹膜终身不变性和差异性的特点来识别身份的，虹膜是一种在眼睛瞳孔内的各色环状物，每个虹膜都包含一个独一无二的基于水晶体、细丝、斑点、凹点、皱纹和条纹等特征的结构。虹膜在眼睛的内部，用外科手术很难改变其结构；由于瞳孔随光线的强弱变化，想用伪造的虹膜代替活的虹膜是不可能的。目前世界上还没有发现虹膜特征重复的案例，就是同一个人的左右眼虹膜也有很大区别。除白内障等原因外，即使接受了角膜移植手术，虹膜也不会改变。虹膜识别技术与相应的算法结合后，可以达到十分优异的准确度，即使全人类的虹膜信息都录入一个数据库，出现假认和假拒的可能性也相当小。

和常用的指纹识别相比，虹膜识别技术操作更简便，检验的精确度也更高。统计表明，到目前为止，虹膜识别的错误率是各种生物特征识别中最低的，并且具有很强的实用性，386 以上计算机和 CCD 摄像机即可满足对硬件的需求。

3）视网膜识别

人体的血管纹路也是具有独特性的，人的视网膜上血管的图样可以利用光学方法透过人眼晶体来测定。用于生物识别的血管分布在神经视网膜周围，即视网膜四层细胞的最远处。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

如果视网膜不受损伤，从三岁起就会终生不变。同虹膜识别技术一样，视网膜识别也是最可靠、最值得信赖的生物识别技术之一，但它运用起来的难度较大。视网膜识别技术要求激光照射眼球的背面以获得视网膜特征的唯一性。

视网膜识别技术的优点：视网膜是一种极其固定的人体生物特征，因为它是“隐藏”的，故而不易磨损、老化或受疾病影响；它是非接触性的；视网膜是不可见的，故而不会被伪造。缺点：视网膜识别技术未经任何测试，可能有损使用者的健康，还需要进一步研究；对于消费者，视网膜识别技术没有吸引力；很难进一步降低它的成本。

4）面部识别

面部识别技术是对面部特征和它们之间的关系（眼睛、鼻子和嘴的位置以及它们之间的相对位置）进行识别。用于捕捉面部图像的两项技术为标准视频和热成像技术：标准视频技术通过视频摄像头摄取面部的图像，热成像技术通过分析由面部的毛细血管的血液产生的热线来生成面部图像。与视频摄像头不同，热成像技术并不需要较好的光源，即使在黑暗情况下也可以使用。

面部识别技术的优点：非接触性。缺点：需要比较高级的摄像头才可有效、高速地拍摄面部图像；使用者面部的位置与周围的光环境都可能影响系统的精确性，而且面部识别是最容易被欺骗的；另外，对于因人体面部如头发、饰物、变老以及其他的变化引起的误差，可能需要通过人工智能技术进行补偿；采集图像的设备比其他技术昂贵得多。这些因素限制了面部识别技术的广泛运用。

5）掌纹识别

掌纹与指纹一样也具有稳定性和唯一性，利用掌纹的线特征、点特征、纹理特征、几何特征等完全可以确定一个人的身份，因此掌纹识别是基于生物特征的身份认证技术的重要内容。目前采用的掌纹图像主要分为脱机掌纹和在线掌纹两大类。脱机掌纹是指在手掌上涂上油墨，然后在一张白纸上按印，再通过扫描仪进行扫描而得到数字化的图像。在线掌纹则是用专用的掌纹采样设备直接获取，图像质量相对比较稳定。随着网络、通信技术的发展，在线身份认证将变得更加重要。

6）手形识别

手形指的是手的外部轮廓所构成的几何图形。手形识别技术中，可利用的手形几何信息包括手指不同部位的宽度、手掌宽度和厚度、手指的长度等。经过生物学家大量实验证明，人的手形在一段时期内具有稳定性，并且两个人的手形是不同的，即手形作为人的生物特征具有唯一性。手形作为生物特征也具有稳定性，并且手形比较容易采集，故可以利用手形对人的身份进行识别和认证。

手形识别是速度最快的一种生物特征识别技术。它对设备的要求较低，图像处理简单，可接受程度较高。由于手形特征不像指纹和掌纹特征那样具有高度的唯一性，因此，手形特征只用于满足中低级安全要求的认证。

7）红外温谱图

人的身体各个部位都在向外散发热量，而这种散发热量的模式就是一种每个人都不同的生物特征。通过红外设备可以获得反映身体各个部位的发热强度的图像，这种图像称为温谱图。拍摄温谱图的方法和拍摄普通照片的方法类似，因此，可以用人体的各个部位来进行鉴别，比如可对面部或手背静脉结构进行鉴别来区分不同的身份。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

温谱图的数据采集方式决定了利用温谱图可以进行隐蔽的身份鉴定。除用来进行身份鉴别外，温谱图的另一个应用是吸毒检测，因为人体服用某种毒品后，其温谱图会显示特定的结构。

温谱图的方法具有可接受性，因为数据的获取是非接触式的，具有非侵犯性。但是，人体的温谱值受外界环境影响很大，对于每个人来说不是完全固定的。目前，已经有温谱图身份鉴别的产品，但由于红外测温设备价格昂贵，导致该技术不能得到广泛应用。

8）人耳识别

人耳识别技术是 20 世纪 90 年代末开始兴起的一种生物特征识别技术。人耳具有独特的生理特征和观测角度的优势，使人耳识别技术具有相当的理论研究价值和实际应用前景。从生理解剖学上，人的外耳分为耳廓和外耳道。人耳识别的对象实际上是外耳裸露在外的耳廓，也就是人们习惯上所说的“耳朵”。完整的人耳自动识别一般包括以下几个过程：人耳图像采集、图像预处理、人耳图像的边缘检测与分割、特征提取、人耳图像的识别。目前的人耳识别技术是在特定的人耳图像库上实现的，一般通过摄像机或数码相机采集一定数量的人耳图像，建立人耳图像库。动态的人耳图像检测与获取尚未实现。

与其他生物特征识别技术相比较，人耳识别具有以下几个特点。

与人脸识别方法比较，人耳识别方法不受面部表情、化妆品和胡须变化的影响，同时保留了面部识别图像采集方便的优点；与人脸相比，整个人耳的颜色更加一致，图像尺寸更小，数据处理量也更小。

与指纹识别方法比较，人耳图像的获取是非接触式的，其信息获取方式容易被人接受。

与虹膜识别方法比较，人耳图像采集更为方便。并且，虹膜采集装置的成本要高于人耳采集装置。

9）味纹识别

人的身体是一种味源，人类的气味虽然会受到饮食、情绪、环境、时间等因素的影响和干扰，其成分和含量会发生一定的变化，但由基因决定的那一部分气味——味纹却始终存在，而且终生不变，可以作为识别任何一个人的标记。

由于气味的性质相当稳定，如果将其密封在试管里制成气味档案，足足可以保存三年，即使是在露天环境中也能保存 18 小时。科学家告诉我们，人的味纹从手掌中可以轻易获得。首先将手掌握过的物品，用一块经过特殊处理的棉布包裹住，放进一个密封的容器，然后通入氮气，让气流慢慢地把气味分子转移到棉布上，这块棉布就成了保存人类味纹的档案。可以利用训练有素的警犬或电子鼻来识别不同的气味。

10）基因（DNA）识别

DNA（脱氧核糖核酸）存在于一切有核的动（植）物中，生物的全部遗传信息都存储在 DNA 分子里。DNA 识别依据的是不同的人体细胞中具有不同的 DNA 分子结构。人体内的 DNA 在整个人类范围内具有唯一性和永久性。因此，除对双胞胎个体的鉴别可能失去它应有的功能外，这种方法具有绝对的权威性和准确性。不像指纹必须从手指上提取，DNA 模式在身体的每一个细胞和组织中都一样。这种方法的准确性优于其他任何生物特征识别方法，它广泛应用于识别罪犯。它的主要问题是使用者的伦理问题和实际的可接受性，DNA 模式识别必须在实验室中进行，不能达到实时以及抗干扰，耗时长是另一个问题，这就限制了 DNA 识别技术的使用；另外，某些特殊疾病可能改变人体 DNA 的结构组成，系统无法正确地对这类人群

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

进行识别。

生物识别技术是一种十分方便与安全的识别技术，它不需要你记住身份证号和密码，也不必随身携带各种卡片，生物测定你就是你，没有什么能比它更安全或更方便了。由于生物识别技术以人的现场参与和不可替代性作为验证的前提和特点，并且基本不受人为的验证干扰，故较之传统的钥匙、磁卡、门卫等安全验证模式具有不可比拟的安全性优势；由于其软件、硬件设施的普及率上升、价格下降等因素，使其在金融、司法、海关、军事以及人们日常生活的各个领域中扮演着越来越重要的角色。

2. 基于行为特征的生物识别技术

1）步态识别

步态是指人们行走时的姿态，这是一种复杂的行为特征。步态识别主要提取的特征是人体每个关节的运动。尽管步态不是每个人都不相同的，但是它也提供了充足的信息来识别人的身份。步态识别输入的是一段行走的视频图像序列，因此其数据采集与面部识别类似，具有非侵犯性和可接受性。但是，由于序列图像的数据量较大，因此步态识别的计算复杂性比较高，处理起来也比较困难。尽管生物力学对步态进行了大量的研究工作，基于步态的身份鉴别的研究工作却刚刚开始。到目前为止，还没有商业化的基于步态的身份鉴别系统。

2）按键识别

按键识别基于人按键时的特性，如按键的持续时间、按不同键之间的时间、出错的频率以及力度大小等，达到进行身份识别的目的。20 世纪 80 年代初期，美国国家科学基金和国家标准局研究证实，按键方式是一种可以被识别的动态特征。

3）签名识别

签名作为身份认证的手段已经使用几百年了，在银行的格式表单中签名是人们身份的标志。将签名数字化是这样一个过程：测量图像本身以及整个签名的动作——在每个字母以及字母之间的不同的速度、顺序和压力。签名识别易被大众接受，是一种公认的身份识别技术。但事实表明，人们的签名在不同的时期和不同的精神状态下是不一样的，这就降低了签名识别系统的可靠性。

3. 兼具生理特征和行为特征的声音识别

声音识别本质上是一个模式识别问题。识别时需要被识别人讲一句或几句实验短句，对它们进行某些测量，然后计算量度矢量与存储的参考矢量之间的一个（或多个）距离函数。语音信号获取方便，并且可以通过电话进行鉴别。语音识别系统对人们在感冒时变得嘶哑的声音比较敏感；另外，同一个人的磁带录音也能欺骗语音识别系统。

由以上介绍我们能够得出用来鉴别身份的生物特征应该具有以下特点。

（1）广泛性：每个人都应该具有这种特征。

（2）唯一性：每个人拥有的特征应该不相同。

（3）稳定性：所选择的特征应该不随时间变化而发生变化。

（4）可采集性：所选择的特征应该便于测量。

实际的应用还给基于生物特征的身份鉴别系统提出了更多的要求，如：性能要求，所选择的生物统计特征能够达到多高的识别率；对于资源的要求，识别的效率如何；可接受性，

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

使用者在多大程度上愿意接受所选择的生物统计特征系统；安全性能，系统是否能够防止被攻击；是否具有相关的、可信的研究背景作为技术支持；提取的特征容量、特征模板是否占用较小的存储空间；价格是否为用户所接受；是否具有较高的注册和识别速度；是否具有非侵犯性等。

遗憾的是，到目前为止，还没有任何一种单项生物特征可以满足上述全部要求。基于各种不同生物特征的身份鉴别系统各有优缺点，分别适用于不同的场合。但对于不同的生物特征身份鉴别系统应有统一的评价标准。

另外，每种生物特征都有自己的适用范围。比如，有些人的指纹无法提取特征，患白内障的人虹膜会发生变化等。在对安全有严格要求的应用领域中，人们往往需要融合多种生物特征来实现高精度的系统识别。数据融合是一种通过集成多知识源的信息和不同专家的意见以产生一个决策的方法，将数据融合方法用于身份鉴别，结合多种生理和行为特征进行身份鉴别，提高鉴别系统的精度和可靠性，这无疑是身份鉴别领域发展的必然趋势。

3.2.3 生物识别系统

生物识别系统（图 3-2）包括“生物特征采集子系统”“数据预处理子系统”“生物特征匹配子系统”和“生物特征数据库子系统”，以及系统识别的对象——人。

“生物特征采集子系统”是通过采集系统自动获得生物特征数据的部分，它对识别对象的生物体进行采样，并把采样信号转化为数字代码。它以特定的规则来表示当前采集到的生物特征，并通过某种安全的方式传送到数据预处理子系统。

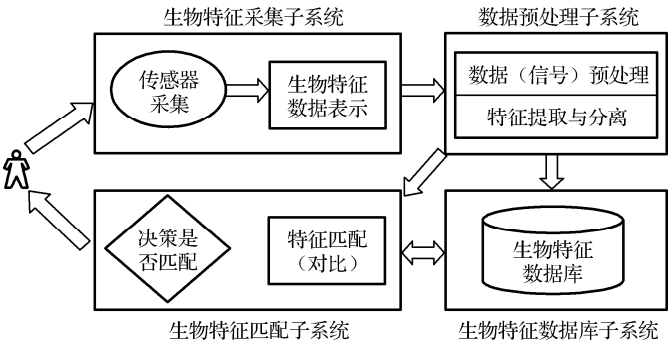


图 3-2 生物识别系统

“数据预处理子系统”对采集到的生物数据进行信号预处理。一般包括滤波去噪、去伪存真、信号平滑处理等。之后通过特定的数学方法，从处理过的数据信号中提取和分离出一系列具有代表性的生物特征值，形成特征值模板，存入生物特征数据库子系统中。

在“生物特征数据库子系统”中，需要建立生物特征与身份信息的关联关系，并且保证数据存储的安全和可靠。

“生物特征匹配子系统”通过模式识别算法，把待识别的生物特征与生物特征数据库子系统中的生物特征进行比对，并按照事先确定的筛选条件（阈值）决策是否匹配成功。如果匹配成功，则输出库中的人员身份信息。

常见的生物识别系统有自动指纹识别系统（AFIS）、自动脸形识别系统、掌形识别系统和

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

虹膜识别系统等。

生物识别系统最为人们关注的两点是准确性和易用性。准确性是生物识别系统存在的前提。但这并不意味着如果不能达到百分之百的准确率，就毫无价值。在刑警办案的许多场合，生物识别系统，如脸形识别系统充当的是一个非常有效的辅助排查手段，但不起决策作用。一般在需要监督人参与的业务系统或者非面向公众的系统中，以及采集对象较少的情况下，采用准确率不是百分之百的生物识别系统，也不失为一个可行而正确的选择。但对于特别强调自动化、无人监督的业务系统，以及面向公众的公共事务系统，准确性要放在首位来考虑。因此，在这种场合，准确率高的指纹识别和虹膜识别系统相对比较受欢迎。

易用性是生物识别系统的另一个被关注点。生物识别系统离不开与人的交互。人每天都会频繁使用身份认证系统。系统操作的方便性、友好性、响应的快速性、操作结果的可获得性、可理解性，都是使用者每天感受到的事情。尤其对于公众应用来讲，单人单次操作的时间如果在 30s 以上，会大大影响公众对该系统的看法。当然作为一个新生事物，生物识别系统正在不断朝着易用的方向迈进。在这个过程中，系统会不断适应人提出来的便利性要求，同时，也需要人去了解和适应系统的一些操作规范。就像自动售票机有一些操作序列一样，人们一开始是需要经过学习和适应的。

为了有效且规范性地获得足够多的生物特征，被识别对象需要按采集子系统的提示进行操作，如在虹膜识别系统中，会要求人注视采集器特定位置多长时间，以便能获得有效的数据。在掌形识别系统中，要求手指按一定的角度分开放置。而在脸形识别系统中，则对人的注视角度和环境光线有一定的要求。在目前众多的生物识别系统中，指纹识别系统在易用性上让人更容易接受。

3.3 磁卡和 IC 卡识别技术

3.3.1 磁卡识别技术

磁卡在 20 世纪 70 年代出现于银行业。当提出标准之后，磁卡变成了为顾客方便服务的有效途径。自动取款机（ATM）的运用使银行能提供更新的服务项目，在适应用户不断增长的同时，可不必要求提高雇员水平或引进昂贵的设施。

目前磁卡已广泛应用于银行、零售业、电话系统、访问控制、机票和运输费用的收取。事实上，现有的磁卡读写设备网点非常多，因而要想将其改变成另一种技术则是一个非常缓慢而又需要很高费用的过程。

1. 主要功能

磁卡技术应用了物理学和磁力学的基本原理。对自动识别设备制造商来说，磁卡就是一层薄薄的由定向排列的铁性氧化粒子组成的材料（也称涂料），用树脂胶合在一起并粘贴在诸如纸或者塑料这样的非磁性基片上。

磁卡介质为保存和修改信息提供了既便宜又灵活的方法。磁卡是由磁性材料掺以黏合剂制成的，在干燥之前要在磁场中加以处理，使磁性材料的磁极取向更适合进行读写。信息通过各种形式的读卡器在磁卡上写入或读出。读卡器中装有磁头，可在卡上写入或读取信息。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

卡上的信息采用二进制编码。

磁卡技术的优点是数据可读写，即具有现场改写数据的能力。数据存储量能满足大多数需求，便于使用，成本低廉，还具有一定的数据安全性。它能黏附于许多不同规格和形式的基材上。这些优点使之在很多领域得到了广泛应用，如信用卡、银行 ATM 卡、机票、公共汽车票、自动售货卡、会员卡、现金卡（如电话磁卡）、地铁自动取款设备等。磁卡的价格也很便宜，但是很容易磨损。磁卡不能折叠、撕裂，数据量较小。

磁卡技术是接触性识读，它与条形码有三点不同：一是其数据可进行部分读写操作，二是给定面积编码容量比条形码大，三是对于物品逐一标识成本比条形码高。接触性识读最大的缺点就是灵活性太差。

2. 通信

磁卡与读卡器之间的通信是通过磁场进行的。读出时将磁卡划过读卡器，读卡器再通过磁头拾取磁卡上磁极极性的变化。在写入时，读卡器要产生一个磁场，从而能够在磁卡上一个较小的区域内有效地改变磁极极性的取向，以向磁卡上写入信息，磁卡与读写装置之间交换信息的速率一般为 12000bps。

与磁卡有关的通信参数有下列几个：记录介质的物理特性、磁卡上磁道的定位、编码技术、译码技术和数据格式等。国际标准化组织（International Organization for Standardization，ISO）对这些参数有两个技术要求，但有许多应用并不遵守这些标准，未能完全遵守这些标准的原因是现有设备的灵活性不够或保密性要求提高等。

3. 存储器

将磁卡放在一个有极性的磁场中时，在磁卡上一个指定的小区域就会感受到一个相似的磁场的作用。这一过程在抹去数据或存储新数据的过程中是重复进行的。

磁卡上的信息容易被其他磁场更改或被抹除，或由于环境的因素而造成损害。为避免这样的损坏，许多制造商、组装厂商和应用工程师往往需要开发抗磁性能更强的磁卡。磁卡的抗磁性能主要以矫顽力来衡量，矫顽力以 kA/m（1kA/m 约为 12.560e）为单位。矫顽力的定义是抹去磁带上已记录的编码信息所需要的磁力。一般矫顽力低的磁卡（3000e）比矫顽力高的磁卡（30000e）更易于被抹去信息或重新被编码。对采用的矫顽力也要有一个限度，当磁卡采用的矫顽力超出 3000～50000e 范围时，一般的读写装置很难对其所记录的信息进行修改。

读卡器的磁头要设计成能与磁卡进行直接接触才能保证其可靠性。任何脏物、化工材料或污垢附着在卡上都会产生干扰，从而显著降低其阅读性能。经实践研究表明，普通磁卡的识读错误率为 0.06%。

磁卡的寿命与读卡器的质量、制卡用的材料以及磁卡和读写设备维护和运行的环境有很大的关系。在大多数情况下，在磁卡信息的完整性问题出现之前可能遭受机械损伤。然而，实际的经验表明，大多数正常使用的磁卡在读取 200 万次以后就会坏掉而需要更换。显然，对于易于损坏的薄纸磁卡来说，这样的读取次数还要低得多。

磁卡上不需要安装电源。使用和存放磁卡的最佳环境是凉爽、干燥和清洁的地方。一般存放磁卡的温度为−40～80℃，操作温度为 0～55℃，操作时允许的相对湿度为 5%～95%（非冷凝温度）。此时，磁场可以修改或抹除存储在磁卡上的信息，或降低磁卡的性能。任何形式

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

的脏物和积聚物在磁卡上都会引起严重磨损或妨碍读写装置对其读出或编码。

4. 系统的运作

磁卡的厚度一般符合 ISO 标准或稍薄一些。制作磁卡的材料包括聚氯乙烯、聚酯、纸张或其他类似的材料。磁卡的重量取决于所选用的材料。但磁卡设计方案的选择应根据具体的应用、所预期的每张卡的价格以及预定的有效期来决定。磁卡的厚度尺寸根据所采用纸张或塑料的不同而有所变化，可以选择各种各样的读写装置，并根据应用而选择不同的尺寸。有些读写设备是完全独立的，并且在嵌入存储设备之后再安装到中央处理设备中。

标准的项目系统配置包括磁卡、读写装置及信息分析平台。由于这些部件可能具有不同的类型，因而可能有几千种不同的配置，每种类型都可具有一种特有的配置。读卡器的控制器接口则可能变化较大，最常用的接口是 RS—232 和 RS—424。

5. 发展趋势

预期使用磁卡的系统不会有更大的发展，但在安全性方面若有新的改进措施，则还可能会有少量的进展。由此可见，磁卡技术在许多方面已接近理论或实际的极限。例如，符合 ISO 标准的磁卡的存储容量将近 1KB，虽然一张卡上可以存入更多的信息，但由于配置的显著差异，将使符合 ISO 标准的读卡器不能读出磁卡上的信息。

有关磁卡上存储信息和格式化的方法，已经有了 ISO 标准。但由于大多数实际应用并不遵守这些标准（由于现有设备的灵活性和出于提高保密性的原因），因而有可能对现行的 ISO 标准进行一些修改，以便适应市场的这些变化。

3.3.2 IC 卡识别技术

IC（Integrated Circuit，集成电路）卡是 1970 年由法国人 Roland Moreno 发明的，他第一次将可编程设置的 IC 芯片放于卡片中，使卡片具有更多功能。通常所说的 IC 卡多数是指接触式 IC 卡。由于接触式 IC 卡对通用设备的需求，最终使得国际标准化组织（ISO）在 1987 年通过了收（付）费卡尺寸标准、I/O（Input/Output，输入/输出）格式、物理触点在卡上的定位等方面的标准。

1. 主要功能

接触式 IC 卡可包含一个微处理器，使其成为真正的智能卡，或者只是简单地成为一个存储卡（作为保密信息存储器件）。通过使用微处理器在卡上进行认证和对信息访问进行控制，可使接触式 IC 卡达到更高一级的保密性。

接触式IC卡的两种主要形式是预付费卡（Prepaid Card）和信用/借记卡（Credit/Debit Card）。预付费卡通常含有少量金额，当使用时金额会减少。预付费卡的典型应用是电话卡和交通卡。信用卡通常记录交易金额，并将其转入用户账户中进行结算。信用卡一般应用于银行卡和零售收（付）费卡。由于信用卡通常有较高的交易额，所以需要信用卡有较高的保密性。在预付卡的大多数应用中，都假定持卡人本身是收（付）费卡的拥有者，然而信用卡则几乎都要采用一种或多种组合的鉴别技术来对用户身份加以认证（例如个人身份证的编号等）。

接触式 IC 卡和磁卡比较有以下特点：安全性高；接触式 IC 卡的存储容量大，便于应用，

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

方便保管；接触式 IC 卡防磁、防静电，抗干扰能力强，可靠性比磁卡高，使用寿命长，一般可重复读写 10 万次以上；接触式 IC 卡的价格稍高些；由于它的触点暴露在外面，有可能因人为的原因或静电损坏。

在日常生活中，接触式 IC 卡的应用也比较广泛。人们接触得比较多的有电话 IC 卡、购电（气）卡、手机 SIM（Subscriber Identity Module，用户身份模块）卡、牡丹交通卡（一种磁卡和 IC 卡的复合卡）以及即将大面积推广的智能水表卡、智能气表卡等。

2. 通信

接触式 IC 卡是通过其表面的电接触点与读写装置之间进行接触而实现通信的，因而在实际操作时 IC 卡必须插入读卡器中才能传送信息。

接触式 IC 卡与读写装置之间的信息传输速率通常为 9600bps。接触式 IC 卡的 ISO 标准通信指标（包括通信方式和规程）在 ISO 7816 第 2 部分中已有说明。

对于大多数接触式 IC 卡，其电源是由读写器通过卡表面的触点提供的。在有些情况下，电池也可装入卡中。依照 ISO 的规定，IC 卡应当在（5±0.5）V 及 1～5MHz 之间的任何频率（时钟速率）下正常工作。

通常的安全防护措施是为增强保密性而提出的，适用于所有类型的接触卡以及其他高存储容量技术，这些安全防护措施主要包括基本识别（无验证）、个人识别码验证、公共按键数据输入系统、生物识别技术（如指纹、视网膜扫描和声音波纹等）。

接触式 IC 卡的保密性会受到如下因素的影响：在卡上执行验证程序的处理能力，存储器的类型，信息传递中用的编译码方式，以及对卡内部电气和存储模块的物理渗透的防护等。

可靠性面临的首要问题是物理接触造成的磨损及对读写设备的损坏行为。当接触式 IC 卡能恰当地插入读卡器中时，数据传输的准确性是很高的；而在采用非接触式 IC 卡（如射频耦合卡）时，则经常会发生干扰问题，但这对于接触式 IC 卡来说却不是大问题。

3. 存储器

接触式 IC 卡的存储容量一般在 2000～8000B，或等效于两张标准文稿纸的容量。由于现在已采用了容量较大、功耗要求较低的芯片，因而未来接触式 IC 卡的容量还要增大。

接触式 IC 卡能够在 0～40℃的温度范围内准确地工作。大多数 IC 卡可以存放或暴露在 35～80℃的温度范围内，而不会损坏或丢失数据。读卡器也可以经受住同样的存储温度，但会有更严格的工作温度范围要求。

接触式 IC 卡工作的相对湿度（不冷凝）一般在 20%～90%，读卡器则可在 25%～85%的相对湿度下工作。

接触式 IC 卡一般可承受下雨和水溅，而读卡器则不能在雨中工作。另外，接触式 IC 卡放入读卡器时必须擦干。接触式 IC 卡能够承受一定程度的脏物、烟雾和紫外线辐射。

4. 系统的运作

接触式 IC 卡系统主要由三部分组成：收（付）费卡、读卡器、中央控制单元（Central Processing Unit，CPU）。

接触式 IC 卡有两种基本类型：存储器卡和微处理器卡。微处理器卡一般用于信用/借记场

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

合，通常会包括一个容量达 8000B 的存储器和一个 8 位的微处理器，具有较高的保密性。

用于接触式 IC 卡的读写装置可分为 4 种类型：智能独立装置、非智能装置、手提式装置和综合式装置。智能独立装置含有微处理器、存储器、键盘和显示器，能够在不连接中央控制单元的情况下完成所有处理功能；非智能装置通常只是简单地为中央控制单元提供一个接口，一般用 RS—232 连接；手提式装置是小电池供电设备，一般只有一个键盘和一个小显示屏；综合式装置是非智能装置，是较大、较复杂设备的一部分（如自动提款机）。中央控制单元执行的功能是协调系统通信，编辑动态信息，管理用户接口或信息显示。中央控制单元由协调一个或多个读卡器的局部设备构成，也可以是通过无线通信链路连接的远程系统。

标准配置涉及对收（付）费卡、读卡器和中央控制单元的利用。根据应用的不同，可以采用上述任何一种类型的读写装置。在一些远距离应用中，在读卡器和中央控制单元之间也可以设立正式的通信链路。在这种情况下，处理过程可能记录在读卡器和收（付）费卡中，过后再及时将汇总信息送到中央控制单元。

IC 卡的物理尺寸在 ISO 7816 第 1 部分有规定（卡的尺寸为 54mm×85.6mm×0.76mm）。卡的重量一般为 1～29g，读卡器的尺寸会因选择的类型而异。

IC 卡的标准接口在 ISO 7816 第 4 部分已有规定，大多数读卡器和控制单元的接口涉及 RS—232 接口的应用。

5. 发展趋势

目前接触式 IC 卡市场的比例是：存储器卡占 90%，微处理器卡占 10%。今后，预计硅芯片在价格和尺寸方面的进一步改进有可能改变这种比例。微处理器卡将来会凭借其较高的保密性和多功能的特点而在整个市场上占有较大的比例。

对接触式 IC 卡的寿命周期一般有两个限制因素：其一是卡的表面触点可承受的磨损程度，其二是读写卡存储器上可操作的读写次数。物理的电学接触是任何电气系统中最为麻烦的问题之一。虽然黄金镀层可以防止腐蚀，但会使成本加大，并易磨损。到目前为止，欧洲在接触式智能卡应用方面有比较好的经验。但是，在触点的性能和耐磨损寿命问题上，任何新系统的设计人员都要加以考虑。非接触式 IC 卡则可以避免这些潜在的问题。

ISO 7816 为接触式 IC 卡制定了合理的物理标准。然而，随着容量更高的存储器的应用和付费卡的用途多元化，其信息格式标准和存储器定位标准等还要正式制定。

3.4 光学字符识别技术

3.4.1 光学字符识别技术概述

光学字符识别（Optical Character Recognition，OCR）是最快的输入方法之一，也是目前办公室自动化讨论的一个主要课题。OCR 的特殊功能是通过扫描把打印、印刷、手写体字符转换成数字信息，以便存储或送入其他电子办公设备。这样可以节省大量输入操作时间，是目前解决系统输入瓶颈问题的重要途径。

OCR 出现于 20 世纪 50 年代中期，是随着模式识别和人工智能的发展而产生的文字识别技术，至今已有几十年的历史。20 世纪 70 年代后期，由于 LSI（Large Scale Integration，大规

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

模集成电路）及 CCD（Charge Coupled Device，电荷耦合器件）的出现，使其进入崭新的实用阶段，在计算机自动录入、票据识别、信函分拣和资料分析等很多方面得到了广泛应用。

OCR 技术的识别原理可以简单地分为相关匹配识别、概率判定准则和句法模式识别三大类。相关匹配识别是根据字符的直观形象提取特征，用相关匹配进行识别。这种匹配既可在空间域内和时间域内进行，也可在频率域内进行。相关匹配又可细分为图形匹配法、笔画分析法、几何特征提取法等。利用文字的统计特性中的概率分布，用概率判定准则进行识别称为概率判定准则法。如利用字符可能出现的先验概率，结合一些其他条件，计算出输入字符属于某类的概率，通过概率进行判别。根据字符的结构，用有限状态文法结构，构成形式语句，用语言的文法推理来识别文字的方法就是语句模式识别法。近年来，人工神经网络和模糊数学理论的发展对 OCR 技术起到了进一步的推动作用。

OCR 的优点是人眼可识读、可扫描；但输入速度和可靠性不如条形码，数据格式有限，通常要用接触式扫描器。对于一般文本，通常以最终识别率、识别速度、版面理解正确率和版面还原满意度作为 OCR 技术的评测依据；而对于表格和票据，通常以识别率或整张通过率和识别速度作为测定 OCR 技术的实用标准。

OCR 的三个重要的应用领域是：办公自动化中的文本输入，邮件自动处理，与自动获取文本过程相关的其他领域。这些领域包括零售价格识读，订单数据输入，证件、支票和文件识读，微电路及小件产品状态特征识读等。由于在识别手迹特征方面的进展，目前正在探索 OCR 技术在手迹分析及签名鉴定方面的应用。

3.4.2 光学字符识别过程

在 OCR 中有许多光电管，排成一个矩阵。当光源照射被扫描的一页文件时，文件中空白的白色部分会发射光线，使光电管产生一定的电压，而有字的黑色部分则把光线吸收掉，光电管不产生电压，这些有、无电压的组合便形成一个模拟信号图案，OCR 再把这些模拟信号图案转化为数字信号，即二进制数据的矩阵。这些矩阵存储在 RAM 中，以便和预先存储在 PROM 里的字符表进行比较。一旦比较成功，就可确定扫描的是哪个字符，然后把该字符转换成 ASCII 码存储起来。

由于识别对象不同而有不同形式的设备。用来识别字符的设备大体上可分为三类：单据标签阅读机、文件阅读机和页式阅读机。其输入速度比键盘输入快 25 倍以上，机器主要由文件传送机构、扫描检视、识别处理、控制和输出等部分组成。常用的扫描方法有光栅扫描法、笔画跟踪法、人工视网膜法等。

识别处理分为三个阶段进行工作，即预处理、特征抽取和判定。

预处理就是将要处理的字形信号进行规格化，把读出的字形的高度和宽度调整到标准尺寸，定出字形的中心点位置等。

特征抽取是在经过规格化调整的字形信息中，确定能表征字与字间区别的属性和特征信息。需要抽取的特征和所用的识别方法有关。若用矩阵匹配法，字形的特征是由对字符进行光栅扫描或用相当于人工视网膜神经元摄像方法所获得的矩阵图像中的黑白点；若用笔画分析法，则其特征就是与字形线走向相似的不规则多边形。

判定是对扫描读出的字符进行识别确定。应先在机器内存储每个参考字符的特征数据，然后将从读出的字符的字形信息中抽取的特征数据同参考字符的特征数据进行比较匹配，直

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

到找到特征相符的参考字符，并认定需要读出的字符即该参考字符为止。实际上是找出匹配度最大的参考字符作为识别出的字符，其识别的流程如图 3-3 所示。

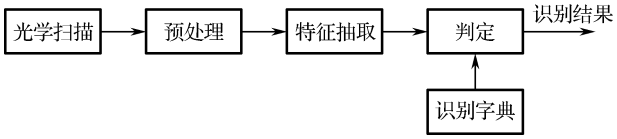


图 3-3 光学字符识别流程

3.4.3 印刷汉字的光学字符识别

给计算机配上一台扫描仪及 OCR 印刷汉字识别软件，就可完成长篇文字的录入工作。

实用印刷汉字识别系统的技术指标有以下几项。

1. 系统识别的字符总数

识别系统所识别的汉字字符集，一般可分为三级：第一级包括国标一级汉字，有 3755 个汉字；第二级包括国标一、二级两级汉字，共有 6763 个；第三级包括扩大的近万个汉字。识别汉字字符集的确定应根据需要和可能综合考虑。由于一级汉字的使用频度已达到 99.7%，而目前 OCR 系统识别率均不可能高于此百分比，因此，扩大字符数对识别率的增加并无效果，反而会提高对计算机内存的要求，识别速度也会显著下降。目前国内研究的系统以国标一级汉字为主，也可以适当增加一些较常用的二级汉字和专用汉字。实用汉字识别系统的识别字符应由汉字、标点符号、数字、英文（或其他外文）字母等组成，字符总数在 4000～8000 个。

2. 识别的字体种类

我国汉字字体总计有 16 种以上，常用的印刷字体有宋、仿宋、黑、楷 4 种，保证这 4 大字体的高识别率，其他类似字体的识别问题也就基本解决了。

3. 识别的字号

我国铅字字号约有 16 种，从特大号到 7 号，大小比例相差约 9.3 倍。只要对不同字号汉字进行一定比例的归一化处理，原则上就可解决所有字号汉字的识别问题。

4. 识别率

识别率是系统最重要的指标，如果只有高速度而没有高的识别率，系统的速度最终将会由于纠错而下降。识别率分为两种，一种是指被正确切分的汉字图像被正确识别的概率，称为单字识别率；另一种是识别结果相对原始文稿而言的正确识别的概率，称为系统识别率。

我国常用的印刷方式有铅印、胶印、激光印刷和点阵打印机打印等，油印已很少使用，喷墨印刷才开始使用。除印刷方式外，印刷文稿的纸张质量将直接影响印刷体文字的识别率。在正常条件下，实用汉字识别系统的单字识别率应达到 98%以上，系统识别率也应在 95%以上。

5. 识别速度

可分为单字识别速度和系统识别速度两种。单字识别速度可以是单位时间内从特征提取

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

到识别结果输出所完成的字数，也可以是单位时间内从行切割、字切割、特征提取到识别结果输出所完成的字数，这两种一般都称为单字识别速度。从文本扫描输入开始，直到识别结果输出，其中可能会有一些辅助操作（如选择识别区域、识别等），这样计算出的单位时间内平均识别的字数称为系统识别速度。

6. 印刷汉字文本的识别过程

（1）原始文稿的扫描输入。用图像扫描仪将文稿扫描输入，再选择适当阈值二值化，得到二值的文稿图像。

（2）文稿版面分析。将输入后的整个版面原始文稿图像分割成一些方块，再将这些方块按版面中不同篇章中的标题、摘要、作者、正文、图像和表格等，对其属性和相互关系加以理解和标注。

（3）字符的切割。将文字块中每一个字符切割出来，包括先将文字行图像切割出来，称为行切割，再将每个文字行的字符一个一个地顺序切割出来，称为字切割。

（4）归一化处理。单个字符图像在特征提取以前，一般要进行归一化处理，包括位置归一化和大小归一化，以便对各种大小的字符都能正确识别。

（5）特征提取。对归一化处理后的单个字符图像进行特征提取，得到每个字符图像的特征描述。

（6）字符的单字识别。根据每一个字符的特征进行预分类，得到待识字符较少的候选字符集合，然后从候选字符集合中将待识字符识别出来。

（7）后处理。通常利用词组、词条和上下文关系对单字识别结果进行后处理纠错。

（8）输出识别结果。最后识别的结果可以显示、打印或利用语音合成设备读出，也可作为文件存入计算机文档系统或直接写入有关数据库中，作为可供查询的文稿文件。

3.4.4 中文手写输入设备

用计算机录入汉字编码时需要牢记大量的词根、规则，编码方式也会扰乱人们的正常思维，因此，编码输入方式目前还局限于专业录入人员使用，非专业人员最常使用的汉字输入方式为汉语拼音方式。但是，汉语拼音并不是一种最佳的输入方式，而能实时地识别人们手写的汉字笔迹的中文输入设备效果更佳。

目前流行的中文手写输入设备有：中华第一笔、中自汉王笔、如意笔、唐人笔和易达笔等。中华第一笔最新加强版蒙恬第一笔 V3.0 以创新的文字切割技术开发出一套整句书写、一次辨认的手写系统，它不限字数及大小，可一次识别屏幕显示，可兼容国内绝大部分中文系统。

汉王联机手写汉字识别系统（汉王笔）由手写板和笔组成，有“压力”及“电磁”两种型号，可用于 2MB 以上内存、386 以上的计算机，使用时接在 RS—232 串口上即可，无须插卡，也可用于笔记本电脑。汉王笔手写板可识别 1.3 万个简、繁、异体字，不限笔顺，可实时识别，识别率可达 98%以上，是国内对用户使用限制最少的手写系统。

由北京大学研制的如意笔是能支持方正内码汉字系统的笔输入汉字系统。如意笔的配置与汉王笔相同，新版如意笔采用以部件为基础的汉字结构判别算法和抗笔画变形干扰的字典匹配算法，高度容忍笔画变形和连笔书写，能混合识别繁、简体汉字，识别率达 95%，符号

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

识别性能好。

唐人笔是一种能在普通计算机屏幕上直接书写的光笔，具有简单、实用、直观的特点，集鼠标、数字化仪、触摸屏于一体。它的笔尖处配有高精度的传感器，分辨率可达 1024×768，定点快速准确。唐人笔所写即所见，非常适合 CAD/CAE、多媒体、广告创意、美术绘画、图形处理、商业自动售货等系统的开发和应用。唐人笔手写输入识别部分采用汉王笔的识别系统，汉字识别率可达 98%；输入屏可切换成手写、拼音、英数、中文符号、英文符号 5 种输入方式，可取代全部键盘操作；唐人笔还支持远程网络汉字输入。

近年来，中文手写输入已为广大的计算机用户所认知，PDA、电子记事簿、计算机词典等设备的出现，使联机手写汉字识别技术的应用更为广泛。目前，虽然中文手写输入技术已日趋成熟，但商品化程度还不高，存在着使用不方便、识别率不高等不足之处。

3.5 条形码技术

3.5.1 条形码概述

条形码由一组按一定编码规则排列的条、空和数字符号组成，用以表示一定的字符、数字及符号组成的信息。条形码技术最早诞生于 Westinghouse 实验室，一位名叫 John Kermode 的发明家想对邮政单据实现自动分拣，他的想法是在信封上做条形码标记，条形码中的信息是收信人的地址，如同今天的邮政编码。为此，Kermode 发明了最早的条形码标识。最早的条形码标识设计方案非常简单，即一个“条”表示数字“1”，两个“条”表示数字“2”，以此类推。之后，Kermode 又发明了由扫描器和译码器构成的识读设备，Kermode 的扫描器利用当时新发明的光电池来收集反射光，“空”反射回来的是强信号，“条”反射回来的是弱信号，通过这种方法，条形码符号可以直接对信件进行分拣。

目前条形码的种类很多，大体可以分为一维条形码（简称条形码）和二维条形码（简称二维码）两种。一维条形码和二维条形码都有许多种码制，条、空图案对数据不同的编码方法，构成了不同的码制。不同码制有其固有的特点，可以用于一种或若干种应用场合。条形码识别是对红外线或可见光进行识别，由扫描器发出的红外线或可见光照射条形码标记，深色的条吸收光，浅色的空将光反射回扫描器，扫描器将光反射信号转换成电子脉冲，再由译码器将电子脉冲转换成数据，最后传至后台。

1. 一维条形码

一维条形码有许多种码制，包括 Code25 码、Code39 码、Code93 码、Code128 码、EAN-8 码、EAN-13 码、ITF25 码、Matrix 码、库德巴码、UPC-A 码和 UPC-E 码等。图 3-4 给出了几种常用的一维条形码。

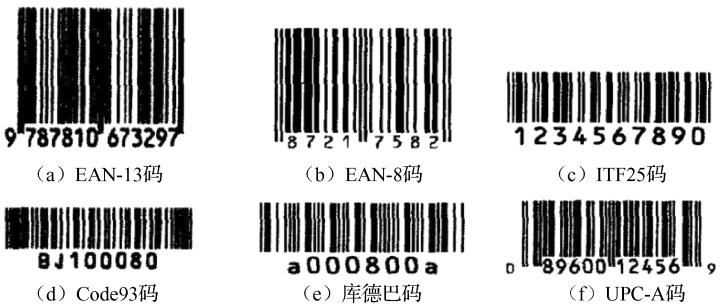
下面就对常用的一维条形码进行简单介绍。

（1）EAN 码

EAN 码是国际物品编码协会制定的一种商品用一维条形码，是国际通用的符号体系，是一种长度固定、无含义的条形码，所表达的信息全部为数字，主要应用于商品标识。EAN 码符号有标准版（EAN-13）和缩短版（EAN-8）两种，我国的通用商品条形码与其等效。我们

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

日常购买的商品包装上所印的一维条形码一般就是 EAN 码。



（a）EAN-13码　（b）EAN-8码　（c）ITF25码

（d）Code93码　（e）库德巴码　（f）UPC-A码

图 3-4　几种常用的一维条形码

（2）UPC 码

UPC 码是美国统一编码委员会制定的一种商品用一维条形码，主要用于美国和加拿大地区，在美国进口的商品上可以看到。

（3）Code39 码和 Code128 码

Code39 码和 Code128 码为目前国内企业内部自定义码制，可以根据需要确定一维条形码的长度和信息，它编码的信息可以是数字，也可以包含字母，主要用于工业、图书及票证的自动化管理，目前使用极为广泛。

（4）库德巴（Codabar）码

库德巴码可表示数字和字母信息，主要用于医疗卫生、图书情报、物资等领域的自动识别。

（5）Code93 码

Code93 码是一种类似于 Code39 码的一维条形码，它的密度较高，能够替代 Code39 码。

（6）Code25 码

Code25 码应用于包装、运输以及国际航空系统的机票顺序编号等。

目前最流行的一维条形码是 EAN-13 码，EAN 是 European Article Number（欧洲物品编码）的缩写。

2. 二维条形码

二维条形码技术是在一维条形码无法满足实际应用需求的前提下产生的。由于受信息容量的限制，一维条形码通常是对物品的标识，而不是对物品的描述。二维条形码能够在横向和纵向两个方向同时表达信息，因此能在很小的面积内表达大量的信息。

二维条形码是用某种特定的几何图形，按一定规律在平面（二维方向）上分布所形成的黑白相间的图形，在代码编制上巧妙地利用计算机内部逻辑基础的 0、1 比特概念，使用若干个与二进制相对应的几何图形来表示文字、数值信息，通过图像输入设备或光电扫描设备自动识读以实现信息自动处理。

目前有几十种二维条形码，分为堆叠式二维条形码和矩阵式二维条形码。

图 3-5 给出了几种常用的二维条形码样图。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

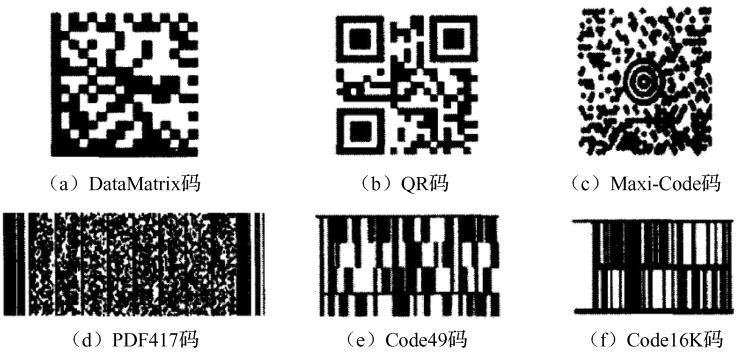


图 3-5 几种常用的二维条形码样图

二维条形码技术自 20 世纪 70 年代初问世以来，发展十分迅速，经过四十多年，它已广泛应用于商业流通、仓储、医疗卫生、图书情报、邮政、铁路、交通运输、生产自动化管理等多个领域。

3. 条形码的应用

目前，条形码技术是最成熟、应用领域最广泛的一种自动识别技术，现已渗透到了商业、仓储、邮电通信、交通运输、图书管理、医疗卫生、票证、工业生产过程控制、物流配送，以及军事装备、工程项目等国民经济各行各业和人民日常生活中。条形码技术已发展成为一项产业，世界各国从事条形码技术及其系列产品开发研究的单位和生产厂商越来越多，条形码技术产品的技术水平越来越高，种类日渐丰富，达到近万种。

二维条形码更是依靠其庞大的信息携带量，能够把过去使用一维条形码时存储于后台数据库中的信息包含在条形码中，可以直接通过阅读条形码得到相应的信息，并且二维条形码还有错误修正技术及防伪功能，增强了数据的安全性。还可把照片、指纹编制于其中，有效地解决了证件的可机读和防伪问题，可广泛应用于护照、身份证、行车证、军人证、健康证、保险卡等。

越来越发达完善的条形码技术不仅在国际范围内为商品提供了一套可靠的代码标识体系，而且为产、供、销等各个环节提供了通用的“语言”，为实现商业数据的自动凭票供应和电子数据交换奠定了基础，推动了电子商务的发展。在商业智能解决方案的帮助下，企业用户可以通过充分挖掘现有的数据资源，捕获信息、分析信息、沟通信息，发现许多过去缺乏认识或未被认识的数据关系，帮助企业管理者做出更好的商业决策，使企业获得最大利润，同时提高企业的竞争能力。

3.5.2 条形码的识别原理

1. 一维条形码

一维条形码是由宽度不同、反射率不同的条和空按照一定的编码规则（码制）编制成的，用以表达一组数字或字母符号信息的图形标识符。常见的一维条形码是由反射率相差很大的黑条（简称条）和白条（简称空）组成的。

由于不同颜色的物体反射的可见光的波长不同，白色物体能反射各种波长的可见光，黑

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

色物体则吸收各种波长的可见光，所以当一维条形码扫描器光源发出的光经光阑及凸透镜后，照射到黑白相间的一维条形码上时，反射光经凸透镜聚焦后，照射到光电转换器上，于是光电转换器接收到与白条和黑条相应的强弱不同的反射光信号，并转换成相应的电信号输出到放大整形电路。白条、黑条的宽度不同，相应的电信号持续时间长短也不同。但是，由光电转换器输出的与一维条形码的条和空相应的电信号一般仅 10mV 左右，不能直接使用，因而先要将光电转换器输出的电信号送放大器放大。放大后的电信号仍然是一个模拟电信号，为了避免由一维条形码中的疵点和污点导致错误信号，在放大电路后须加整形电路，把模拟信号转换成数字电信号，以便计算机系统能准确判读。

整形电路的脉冲数字信号经译码器译成数字、字符信息。它通过识别起始、终止字符来判断一维条形码符号的码制及扫描方向，通过测量脉冲数字电信号 0、1 的数目来判断条和空的数目，通过测量 0、1 信号持续的时间来判断条和空的宽度。这样便得到了被识读的一维条形码条和空的数目，以及相应的宽度和所用码制，根据码制所对应的编码规则，便可将一维条形码转换成相应的数字、字符信息，通过接口电路送给计算机系统进行数据处理与管理，便完成了一维条形码识读的全过程。

因此，为了读出一维条形码所代表的信息，需要一套一维条形码识别系统，它由一维条形码扫描器、放大整形电路、译码接口电路和计算机系统等部分组成。

一维条形码识读的基本工作过程：光源发光→照射到一维条形码符号上→光反射→光电转换器接收并进行光电转换产生模拟电信号→信号经过放大、滤波、整形形成方波信号→译码器译码→数字信号。

为了能够正确地解译一维条形码，在解译一维条形码符号所表示的数据之前，需要先进行一维条形码扫描方向的判别。EAN-13 码的起始字符和终止字符的编码结构都是“101”，只能通过它进行码制的判别（对于多种一维条形码识别，其他码制的一维条形码起始字符和终止字符都不是“101”），不能通过起始字符和终止字符来判别扫描方向。由 EAN-13 码的编码结构可知，它的右侧字符为全偶，而左侧字符的奇偶顺序由前置符决定，没有全偶的，从而可以利用此原理来确定 EAN-13 码的扫描方向。如果扫描到的前 6 个字符为全偶，即反向扫描，否则为正向扫描。

2. 二维条形码

1）矩阵式二维条形码原理

矩阵式二维条形码（又称棋盘式二维条形码）通过黑、白像素在矩阵中的不同分布进行编码。在矩阵元素位置上，出现方点、圆点或其他形状点表示二进制数“1”，不出现点表示二进制数“0”，点的排列组合确定了矩阵式二维条形码所代表的意义。矩阵式二维条形码是建立在计算机图像处理技术、组合编码原理等基础上的一种新型图形符号自动识读处理码制。具有代表性的矩阵式二维条形码有 Code One 码、Maxi-Code 码、QR 码、DataMatrix 码等。

2）行排式二维条形码原理

行排式二维条形码（又称堆叠式二维条形码或层排式二维条形码）的编码原理建立在一维条形码基础之上，按需要堆叠成两行或多行。它在编码设计、校验原理、识读方式等方面继承了一维条形码的一些特点，识读设备及印刷与一维条形码技术兼容。但由于行数的增加，需要对行进行判定，其译码算法与软件也不完全与一维条形码相同。有代表性的行排式二维

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

条形码有 Code49 码、Code16K 码、PDF417 码等。其中，Code49 码是 1987 年由 David Allair 博士研制，Intermec 公司推出的第一个二维条形码。

3）二维条形码识别过程

在条形码识读中被广泛使用的另一项技术是光学成像数字化技术。其基本原理是通过光学透镜成像在半导体传感器上，再通过模拟/数字转化（传统的CCD技术）或直接数字化（CMOS技术）输出图像数据。CMOS 将采集到的图像数据送到嵌入式计算机系统处理。处理的内容包括图像获取、解码、纠错、译码，最后处理结果通过通信接口（如 RS—232）送往 PC 等。二维条形码识别过程如图 3-6 所示。

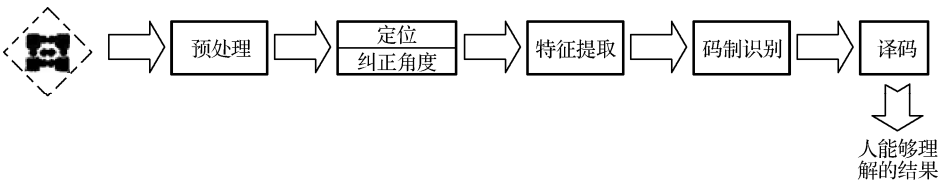


图 3-6 二维条形码识别过程

3.5.3 条形码的特点与功能

1. 条形码的特点

条形码技术是电子与信息科学领域的高新技术，所涉及的技术领域较广，是多项技术相结合的产物，经过多年的研究和应用实践，现已发展成为较成熟的实用技术。在信息输入领域中采用的自动识别技术种类很多。条形码作为一种图形识别技术与其他识别技术相比有如下优点。

（1）简单条形码符号制作容易，扫描操作简单易行。

（2）信息采集速度快。普通计算机的键盘录入速度是 200 个字符/分钟，而利用条形码扫描录入信息的速度是键盘录入的 20 倍。

（3）采集信息量大。利用条形码扫描，一次可以采集几十个字符的信息，而且可以通过选择不同码制的条形码增加字符密度，使采集的信息量成倍增加。

（4）可靠性高。键盘录入数据，误码率为三百分之一。利用光学字符识别（OCR）技术，误码率约为万分之一。而采用条形码扫描录入方式，误码率仅有百万分之一，首读率可达 98% 以上。

（5）灵活、实用。条形码符号作为一种识别手段可以单独使用，也可以和有关设备组成识别系统实现自动化识别，还可和其他控制设备联系起来实现整个系统的自动化管理。同时，在没有自动识别设备时，也可实现手工键盘输入。

（6）自由度大。识别装置与条形码标签相对位置的自由度要比光学字符识别大得多。条形码通常只在一维方向上表示信息，而同一条形码符号上所表示的信息是连续的，这样即使标签上的条形码符号在条的方向上有部分残缺，仍可以从正常部分识读正确的信息。

（7）设备结构简单、成本低。条形码符号识别设备结构简单，操作容易，无须专门训练。与其他自动化识别技术相比较，推广应用条形码技术所需费用较低。

（8）可扩展。目前在世界范围内得到广泛应用的 EAN 码是国际标准的商品编码系统，横

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

向、纵向发展余地都很大，现已成为商品流通业、生产自动管理，特别是电子数据交换和国际贸易的一个重要基础，并将发挥巨大作用。

正因为条形码技术具有众多优点，因而被广泛地应用于各行各业，特别是商品流通领域，为整个社会带来了可喜的经济效益。

二维条形码除具有上述优点外，还有以下特点。

（1）高密度编码，信息容量大。可容纳多达 1850 个大写字母、2710 个数字、1108 字节或 500 多个汉字，比普通条形码信息容量高几十倍。

（2）编码范围广。可以把图片、声音、文字、签字、指纹等可以数字化的信息进行编码，用条形码表示出来；可以表示多种语言文字；可表示图像数据。

（3）容错能力强，具有纠错功能。这使得二维条形码因穿孔、污损等引起局部损坏时，照样可以正确得到识读，损毁面积达 50%仍可恢复信息。

（4）译码可靠性高，误码率不超过千万分之一。

（5）可引入加密措施，保密性、防伪性好。

（6）成本低，易制作，持久耐用。

（7）条形码符号形状、尺寸、比例可变。

（8）二维条形码可以使用激光或 CCD 阅读器识读。

尽管似乎二维条形码的优点更多一些，但是一维条形码仍然占据了相当大的应用市场，二者的区别见表 3-2。

表 3-2　一维条形码与二维条形码的区别

项目/类型	一维条形码	二维条形码
资料密度与容量	密度低，容量小	密度高，容量大
错误侦测及自我纠正能力	可以进行错误侦测，但没有错误纠正能力	有错误检验及错误纠正能力，并可根据实际应用设置不同的安全等级
垂直方向的资料	不存储资料，垂直方向的高度是为了识读方便，并弥补印制缺陷或局部损坏	携带资料，对印制缺陷或局部损坏等错误可以纠正并恢复
主要用途	主要用于对物品的标识	用于对物品的描述
资料库与网络依赖性	多数场合须依赖资料库及通信网络的存在	可不依赖资料库及通信网络的存在而单独应用
识读设备	可用线型扫描器识读，如光笔、线型 CCD、激光扫描枪	对于堆叠式可用线型扫描器多次扫描，也可用图像扫描仪识读，矩阵式则仅能用图像扫描仪识读

2. 条形码的功能

条形码是用来收集有关任何人、地或物的资料的自动识别技术中的主要部分。

条形码的应用是无限的。它可用于物品检索、存货控制、时间和出勤记录、生产过程的监视、质量控制、进出分类、订单的输入、资料的检索、对警戒地区的进入控制、送货与收货、仓库管理、路线管理、柜台售货等。

条形码本身不是一个系统，它是一个极端有效率的识别工具，可以为先进的管理体制的

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

信息要求提供准确、及时的支持。条形码的使用普遍地提高了准确性和工作效率，降低了成本，改善了业务运作。

利用条形码技术经营管理后，消费者可以从中受益。

（1）可以缩短顾客排队时间；

（2）准确性高，不用担心往计算机中输入数字时出错；

（3）商店的经营成本降低，从而使商品价格也随之下降。

3.5.4 条形码的结构

1. 一维条形码的基本术语

一维条形码由两侧静区、起始字符、数据字符、校验字符和终止字符组成，如图 3-7 和图 3-8 所示。图 3-8 中省略了校验字符。

静区	起始字符	数据字符	校验字符	终止字符	静区

图 3-7 一维条形码的组成

图 3-8 一维条形码的结构

一维条形码的基本术语有以下几种。

（1）起始字符。一维条形码符号的第一位字符，标志一个一维条形码符号的开始。阅读器确认此字符存在后开始处理扫描脉冲。

（2）数据字符。位于起始字符后面的字符，标志一个一维条形码符号的值，其结构异于起始字符，可允许进行双向扫描。

（3）校验字符。校验字符代表一种算术运算的结果，阅读器在对一维条形码进行解码时，对读入的各字符进行规定的运算，如运算结果与校验字符相同，则判定此次阅读有效，否则不予读入。

（4）终止字符。终止字符是一维条形码符号的最后一位字符，标志一个一维条形码符号的结束，阅读器确认此字符后停止处理。

（5）静区。静区位于一维条形码符号的两侧，是无任何符号及信息的白色区域，提示一维条形码阅读器准备扫描。

（6）符号。符号由静区和一组一维条形码字符组合而成，表示一个完整数据，即一个物品的条形码。

（7）元素。元素用来表示一维条形码的条和空。

（8）字符。字符是用来表示一个数字、字母或符号的一组一维条形码元素。

（9）条和空。条和空是一维条形码符号中深色和浅色的元素。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

（10）一维条形码逻辑值。一维条形码逻辑值是一维条形码元素表示的逻辑值，用二进制数表示。

（11）一维条形码字符集。一维条形码字符集是某种一维条形码规则中给定的可标志的数据范围，一般有纯数字集、数字加字母及符号集等。

（12）对比度（PCS）。对比度表示一维条形码符号中条的反射率 R_L 与空的反射率 R_D 的关系。可用公式表示如下：

$$PCS=(R_L-R_D)/R_L\times100\%$$

2. 一维条形码的结构

目前，国际上广泛使用的一维条形码种类有 EAN 码、UPC 码（商品条形码，用于在世界范围内唯一标识一种商品。在超市中最常见的就是 EAN 码和 UPC 码）、Code39 码（可表示数字和字母，在管理领域应用最广）、ITF25 码（在物流管理中应用较多）、Codabar 码（可表示数字和字母信息，主要用于医疗卫生、图书情报、物资等领域的自动识别）。其中，EAN 码是当今世界上广为使用的商品条形码，已成为电子数据交换（EDI）的基础；UPC 码主要在美国和加拿大使用；在各类一维条形码应用系统中，Code39 码因其可采用数字与字母共同组成的方式而在各行业内部管理中被广泛使用；在血库、图书馆和照相馆的业务中，Codabar 码也被广泛使用。

1）Code39 码

Code39 码是 Intermec 公司于 1975 年推出的一种一维条形码，它由数字、英文字母以及“-”“.”“/”“+”“%”“$”“*”和空格共 44 个符号组成，其中，“*”仅作为起始符和终止符，如图 3-9 所示。

图 3-9　Code39 码

Code39 码仅有两种元素宽度，分别对应宽元素和窄元素。宽元素的宽度为窄元素的 1～3 倍，一般选用 2 倍、2.5 倍或 3 倍，宽元素二进制逻辑值为“1”，窄元素二进制逻辑值为“0”。

Code39 码的每一个一维条形码字符由 9 个元素组成，其中有 3 个宽元素，其余是窄元素，因此称为 Code39 码。三个宽元素中有两个宽条、一个宽空，6 个窄元素中有三个窄条、三个窄空。Code39 码可将 ASCII 码的 128 个字符全部编码。

Code39 码具有编码规则简单、误码率低、所能表示字符个数多等特点，因此在各个领域有着极为广泛的应用。

2）EAN 码

EAN 码有两种版本，即标准版和缩短版。标准版表示 13 位数字，又称 EAN-13 码；缩短版表示 8 位数字，又称 EAN-8 码。两种一维条形码的最后一位为校验位，由前面的 12 位或 7 位数字计算得出。

EAN 码由前缀码、厂商代码、商品项目代码和校验码组成。前缀码是国际 EAN 组织标识

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

各会员组织的代码，我国为 690、691 和 692；厂商代码是 EAN 编码组织在 EAN 分配的前缀码的基础上分配给厂商的代码；商品项目代码由厂商自行编码；校验码可校验代码的正确性。在编制商品项目代码时，厂商必须遵守商品编码的基本原则：对同一商品项目的商品必须编制相同的商品项目代码，对不同的商品项目必须编制不同的商品项目代码，保证商品项目与其代码一一对应，即一个商品项目只有一个代码，一个代码只标识一个商品项目。

例如，光明特浓鲜奶的一维条形码为 6901209312953。其中，690 代表我国 EAN 组织，1209 代表上海光明乳业有限公司，31295 是 950mL 盒装特浓鲜奶的商品代码。这样的编码方式保证了在全球范围内 6901209312953 唯一对应一种商品。

EAN 码采用 4 种元素宽度，即每个条或空可以有 1、2、3 或 4 倍的元素宽度。EAN-13 码的前 6 位采用左手符规则，后 6 位采用右手符规则。

EAN-13 码从空白区开始共 113（95+18）个模块，每个模块宽 0.33mm，一维条形码符号总宽度为 113×0.33mm=37.29mm，如图 3-10 所示。

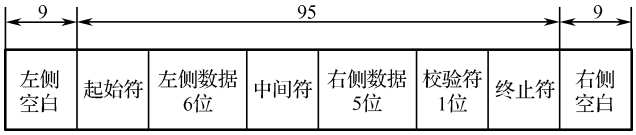


图 3-10　EAN-13 码的构成

EAN-13 码的起始符与终止符相同，均为两个细条（101），中间符为 01010，我国的 EAN-13 码国家代码已开通使用的有 690～692。当前缀码为“690”“691”时，第 4～7 位数字为厂商代码，第 8～12 位数字为商品项目代码，第 13 位数字为校验码；当前缀码为“692”时，第 4～8 位数字为厂商代码，第 9～12 位数字为商品项目代码，第 13 位数字为校验码，如图 3-11 所示。

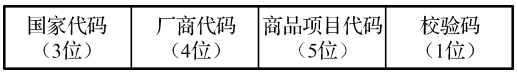


图 3-11　EAN-13 码结构

另外，图书和期刊作为特殊的商品也采用了 EAN-13 码表示 ISBN 和 ISSN。前缀 977 被用于期刊号 ISSN，图书号 ISBN 用 978 作为前缀，我国被分配使用 7 开头的 ISBN 号，因此我国出版社出版的图书上的一维条形码全部为 9787 开头。

EAN-8 码是 EAN-13 码的缩短码，EAN-8 码由 8 位数字组成，前两位为国别码，后 5 位为产品码，最后一位是校验码。EAN-8 码从空白区开始共 81（67+14）个模块，每个模块宽 0.33mm，条形码符号总宽度为 81×0.33mm=26.73mm，如图 3-12 所示。

图 3-12　EAN-8 码的构成

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

3）UPC 码

1973 年，美国开始在商业领域应用 UPC 码，字符集为数字 0～9。目前，UPC 码主要在美国与加拿大使用。UPC 码共有 UPC-A 码、UPC-B 码、UPC-C 码、UPC-D 码、UPC-E 码 5 种版本，其中，UPC-B 码是 UPC-A 码的压缩码，UPC-A 码及 UPC-B 码与 EAN-13 码及 EAN-8 码兼容。UPC-A 码由 11 位数字/字符和一位系统字符共 12 位数据组成，其中，第 1 位是国别码，代表商品的国家和地区；第 2～6 位是厂商码，代表商品的生产厂商；第 7～11 位是产品码，是商品的代码；最后 1 位是检验码，作为扫描成功的依据。UPC-A 码的构成如图 3-13 所示。

图 3-13　UPC-A 码的构成

UPC-A 码被中间符分为左右两部分，两侧编码的规则是不同的，左侧为奇，右侧为偶，与 EAN 码的编码规则也不同。UPC-A 码从空白区开始，由 113（95+18）个模块组成，每个模块宽 0.33mm，一维条形码符号共宽 113×0.33mm=37.29mm。

3. 二维条形码的结构

目前，二维条形码主要有 PDF417 码、Code49 码、Code16K 码、DataMatrix 码、Maxi-Code 码等，主要分为堆叠或层排式和棋盘或矩阵式两大类。

1）PDF417 码

PDF417 码是一种多层、可变长度的符号，具有大容量及错误纠正功能。PDF417 码可由线型扫描器、光栅激光扫描器或图像激光扫描器扫描。一个 PDF417 码的符号可用于表示多于 1100 字节、1800 个 ASCII 字符或 2700 个数字的数据，具体数目取决于组合模式。PDF417 码符号由多层堆叠而成，其层数为 3～90。每层包括：左空白区、起始符、左层指示符、数据符、右层指示符、终止符及右空白区，每层高度至少为 3X，X 是模块宽，是符号最重要的尺寸之一，在一个 PDF417 码中，X 的值是固定不变的，PDF417 码的构成如图 3-14 所示。由于其层数与每层的符号/字符是可变的，故可根据实际印刷空间做成不同尺寸（纵横比）的符号。

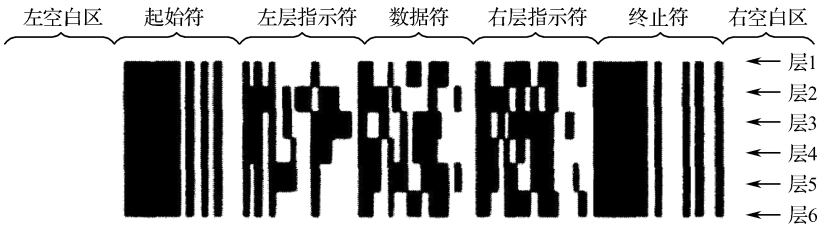


图 3-14　PDF417 码的构成

PDF417 码的符号/字符以（17，4，6）的方式组合，即每个符号/字符由 4 个条及 4 个空组成，每个条或每个空由 1～6 个模块组成，其模块总数为 17。PDF417 码的符号/字符集分成三个不同的“簇”，每簇可表示 929 个 PDF417 符号/字符的值（或称码词）。由于每个相邻层

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IN

的符号/字符都取自不同的簇，因此在识读 PDF417 码时，译码器可穿过不同层的扫描数据，每一层的扫描线不必落在一层之内。

通过向数据信息中添加错误纠正码词，PDF417 码支持错误纠正。每个 PDF417 码的符号至少需要两个错误纠正码词用于错误校验，最多可向数据信息中添加 512 个码词用于错误纠正。从数学上讲，这种方法在译码安全性方面要比单一的校验字符高出多个数量级。

每一个 PDF417 码至少应有两个错误纠正码词。错误纠正码词提供了错误检查及纠正功能。PDF417 码可根据实际需要设置不同的安全等级（0～8 级）。错误纠正码词则由数据码词通过一个错误纠正多项式计算而得。

不同安全等级所需要的错误纠正码词个数如下。

安全等级：　　0　1　2　3　4　5　6　7　8

错误纠正码词个数：2　4　8　16　32　64　128　256　512

PDF417 码为一种多模式二维条形码，共有三种组合模式。可通过模式转换与模式锁定字符在三种组合模式之间进行转换，从而实现对信息的有效组合。PDF417 码是一种堆叠式二维条形码，目前应用最为广泛。PDF417 码是由美国 Symbol 公司发明的，PDF（Portable Data File）的意思是“便携数据文件”。组成二维条形码的每一个字符由 4 个条和 4 个空共 17 个模块构成，故称 PDF417 码。

2）Maxi-Code 码

Maxi-Code 码符号由 884 个六边形模块构成，如图 3-15 所示。这些模块共排成 33 层，每层最多由 30 个模块组成。由三条圆形暗带及相间的三条明带组成的定位图形位于符号的中央，用于扫描定位，6 个由三个模块组成的定位信息均匀分布在定位图形的四周。整个符号的四周由一定尺寸的空白区包围。每个 Maxi-Code 码符号/字符由 6 个方形模块组成。

一个 Maxi-Code 码由 144 个符号/字符组成，这些符号/字符由主信息和辅助信息两部分组成，符号/字符的次序安排由以下规则决定：主信息中的符号/字符（1～144）以环定位图形放置。辅助信息中符号/字符（21～144）自上而下，第一层自左向右，第二层自右向左，第三层自左向右，以此类推。

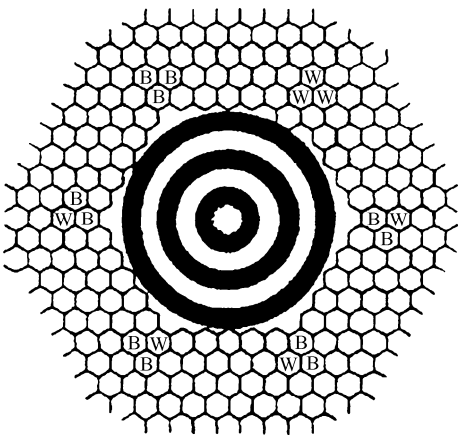


图 3-15　Maxi-Code 码

Maxi-Code 码中信息表示的方法为：先将数据流转换成码词（值为 0～63）流，然后将码

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

词对应的符号/字符在各种模式之间进行转换，以便有效地表示数据。

Maxi-Code 码有两种错误纠正等级，用于不同要求的错误检测及纠正。

Maxi-Code 码数据结构具有 7 种数据模式（0～6），用于在一个符号中定义数据及纠正错误。

3）QR 码

每个 QR 码符号由名义上的正方形模块构成，组成一个正方形阵列，它由编码区域和包括寻像图形、分隔符、定位图形和校正图形在内的功能图形组成。功能图形不能用于数据编码。符号的四周由空白区包围。图 3-16 为 QR 码的结构。

QR 码符号共有 40 种规格，分别为版本 1～40。版本 1 的规格为 21 个模块×21 个模块，版本 2 为 25 个模块×25 个模块，以此类推，每一版本符号比前一版本每边增加 4 个模块，直到版本 40，规格为 177 个模块×177 个模块。

（1）寻像图形。寻像图形包括三个相同的位置探测图形，分别位于符号的左上角、右上角和左下角。每个位置探测图形可以看成由三个重叠的同心的正方形组成，它们分别为 7×7 的深色模块、5×5 的浅色模块和 3×3 的深色模块。如图 3-17 所示，位置探测图形的模块宽度比为 1 : 1 : 3 : 1 : 1。符号中其他地方遇到类似图形的可能性极小，因此可以在视场中迅速地识别可能的 QR 码符号。识别组成寻像图形的三个位置探测图形，可以明确地确定视场中符号的位置和方向。

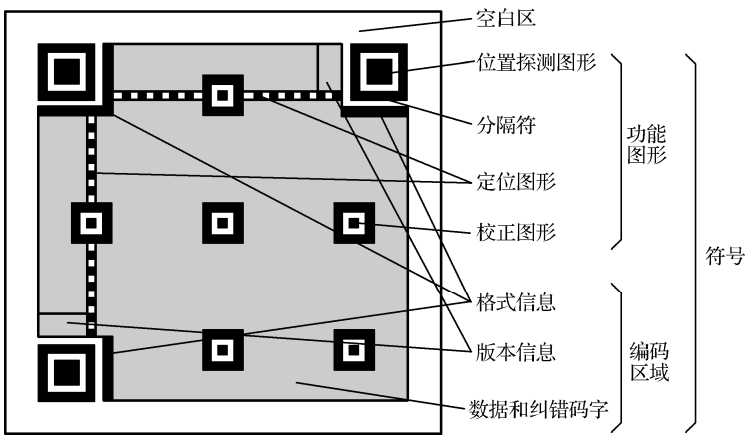


图 3-16　QR 码的结构

（2）分隔符。在每个位置探测图形和编码区域之间有宽度为一个模块宽的分隔符。

（3）定位图形。水平和垂直定位图形分别为一个模块宽的一行和一列，由深色、浅色模块交替组成，其开始和结尾都是深色模块。水平定位图形位于上部的两个位置探测图形之间，符号的第 6 行。垂直定位图形位于左侧的两个位置探测图形之间，符号的第 6 列。它们的作用是确定符号的密度和版本，提供决定模块坐标的基准位置。

（4）校正图形。每个校正图形可看成三个重叠的同心正方形，由 5×5 的深色模块、3×3 的浅色模块以及位于中心的一个深色模块组成。校正图形的数量视符号的版本号而定，在模式 2 的符号中，版本 2 以上（含版本 2）的符号均有校正图形。

（5）编码区域。编码区域包括表示数据码字、纠错码字、版本信息和格式信息的符号/字符。

（6）空白区。空白区为环绕在符号四周的 4 个模块宽的区域，其反射率应与浅色模块相同。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

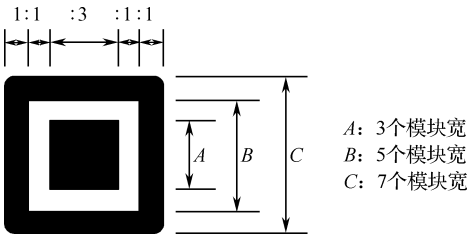


图 3-17 位置探测图形的结构

3.6 射频识别技术

3.6.1 射频识别技术的概念与特点

射频识别（Radio Frequency Identification，RFID）技术，又称电子标签、无线射频识别，是一种非接触式自动识别技术。它通过射频信号自动识别目标对象并获取相关数据，识别工作无须人工干预，可工作于各种恶劣环境；射频识别技术可识别高速运动物体并可同时识别多个标签，操作快捷方便，其识别距离可达几十米。

20 世纪 40 年代，雷达的改进和应用催生了 RFID 技术。到了 20 世纪 60 年代，RFID 技术的理论得到了发展，开始了一些应用尝试：进军商业领域，并出现了第一个商用 RFID 系统——电子商品监视（Electronic Article Surveillance，EAS）设备。随后，RFID 技术逐渐应用在电子收费系统、物体跟踪、安防等各个领域。防碰撞技术、加密技术等新技术的研制成功使得 RFID 的应用领域进一步扩大。下面仅就 RFID 系统和特点做一些概括介绍。

1. RFID 系统

最简单的 RFID 系统由电子标签和读写器组成。当带有电子标签的物品通过读写器时，标签被读写器激活并通过无线电波将标签中携带的信息传送到读写器中，读写器接收信息，完成自动采集工作，如图 3-18 所示。

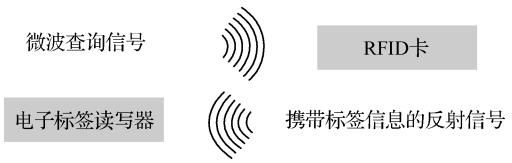


图 3-18 RFID 工作原理

典型的 RFID 系统包括硬件和软件两部分。其中，硬件部分由电子标签和读写器组成，软件部分由中间件和应用软件组成。在实际应用中，电子标签中保存有约定格式的电子数据，附在待识别物体的表面，而读写器通过天线发送出一定频率的射频信号。当标签进入磁场时产生感应电流从而获得能量，发送出自身编码等信息，被读写器读取并解码后送至主机中的 RFID 中间件。RFID 中间件对接收到的信息进行相关处理后提供高层信息给上层企业应用。

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

1）电子标签

电子标签也称应答器，是 RFID 系统真正的数据载体，它由标签芯片和标签天线构成。标签天线接收阅读器发出的射频信号，标签芯片对接收的信息进行解调、解码，并把内部保存的数据信息编码、调制，再由标签天线将已调的信息发射出去。

2）读写器

读写器也称阅读器，主要完成与电子标签之间的通信，与计算机之间的通信，对读写器与电子标签之间传送的数据的编码、解码、加密、解密等，并且具备防碰撞功能，能够实现同时与多个标签通信。读写器由射频模块和基带控制模块组成。射频模块用于产生高频发射能量，激活电子标签，为无源式电子标签提供能量；对于需要发送至电子标签的数据进行调制并发射；接收并解调电子标签发射的信号。基带控制模块用于信号的编码、解码、加密、解密；与计算机应用系统通信，并执行从应用系统发来的命令；执行防碰撞算法。

3）中间件

随着 RFID 的广泛使用，不同硬件接口的 RFID 硬件设备越来越多。软件上，应用程序的规模越来越大，出现了各式各样的系统软件及用户数据库。如果每个技术细节的改变都要求衔接 RFID 系统各部分的接口改变，那么 RFID 的发展将会受到严重制约，后期维护、管理的工作量也会大大增加。RFID 中间件不仅屏蔽了 RFID 设备的多样性和复杂性，还可以支持各种标准的协议和接口，将不同操作系统或不同应用系统的应用软件集成起来。当用户改变数据库或增加 RFID 数据时，只更改中间件的部分设置就可以使整个 RFID 系统继续运行，省去了重新编写源代码的麻烦，也为用户节省了费用。

4）应用软件

应用软件是直接面向 RFID 应用的最终用户的人机交互界面。在不同的应用领域，应用软件各不相同，因此需要根据不同应用领域的不同企业专门定制，很难具有通用性。它以可视化的界面协助使用者完成对读写器的指令操作以及对中间件的逻辑设置，逐级将 RFID 技术事件转化为使用者可以理解的业务事件。

2. RFID 特点

RFID 是自动识别技术的一个重要的分支，在众多自动识别技术中最具有竞争优势，发展最迅速。在感知识别层的 4 大感知技术中，RFID 居于首位，是物联网的核心技术之一。

RFID 技术最大的优点在于非接触，整个识别工作不需要像条形码那样，必须扫描仪“看到”条形码才能读取，它的识读距离可以从十厘米到几十米不等；并且 RFID 不再像条形码那样需要扫描，在 RFID 的标签中存储着规范的信息，通过无线数据通信网络可以将其自动采集到中央信息系统，RFID 磁条可以以任意形式附带在包装中，不需要像条形码那样占用固定空间；另外，RFID 不需要人工去识别标签，读写器每 250ms 就可以从射频标签中读出位置和商品相关数据；最后，RFID 还具有识别速度快、可识别高速运动物体、抗恶劣环境、保密性强、可同时识别多个对象等特点。

由于 RFID 的种种特点，使得它适用的领域较广，包括物流跟踪、运载工具和货架识别等要求非接触数据采集和交换的场合，并且对于需要频繁改变数据内容的场合尤为适用。当然，RFID 在物流领域的应用不仅涉及 RFID 技术本身，还涉及管理、硬件、软件、网络、系统安全、无线电频率等许多方面。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

同样，RFID 技术也存在一些缺点，比如标签成本相对较高，而且一般不能随意扔掉等。但是制约射频识别系统发展的主要问题是不兼容的标准。射频识别系统的主要厂商提供的都是专用系统，导致不同的应用和不同的行业采用不同厂商的频率和协议标准，这种混乱和割据的状况已经制约了整个射频识别行业的发展。许多欧美组织正在着手解决这个问题，并已经取得了一些成绩。标准化必将刺激射频识别技术的快速发展和广泛应用。

3.6.2 射频识别技术的原理和分类

1. RFID 的系统构成

从系统的工作原理来看，RFID 系统的组成如图 3-19 所示。

射频识别系统实际上就是阅读器与标签之间用无线电频率进行通信的无线通信系统，射频标签是信息的载体，应置于要识别的物体上或由个人携带；阅读器可以具有读或读写功能，这取决于系统所用射频标签的性能。

1）标签

在 RFID 系统中，信号发射机为了不同的应用目的，会以不同的形式存在，典型的形式是标签（Tag）。标签相当于条形码技术中的条形码符号，用来存储需要识别、传输的信息，在实际应用中，标签附着在待识别物体的表面。标签一般是带有线圈、天线、存储器与控制系统的低电集成电路。典型的标签结构如图 3-20 所示。

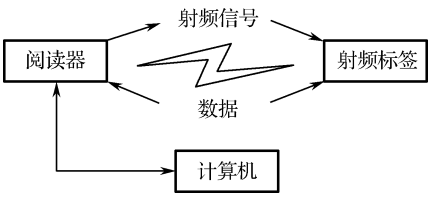


图 3-19 RFID 系统的组成

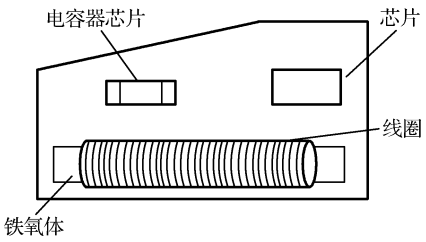


图 3-20 典型的标签结构

2）阅读器

在 RFID 系统中，信号接收机一般叫作阅读器。阅读器又称读出装置，可无接触地读取并识别标签中所保存的电子数据，从而达到自动识别物体的目的，进一步通过计算机及计算机网络实现对物体识别信息的采集、处理及远程传送等管理功能。阅读器的组成如图 3-21 所示。其各部分的功能如下。

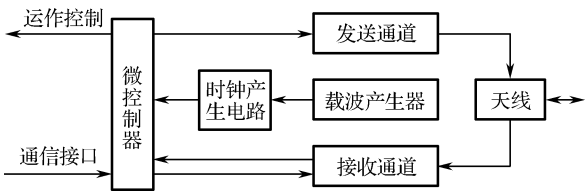


图 3-21 阅读器的组成

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

（1）发送通道：对载波信号进行功率放大，向应答器传送操作命令及写数据。

（2）接收通道：接收射频标签传送至阅读器的响应及数据。

（3）载波产生器：采用晶体振荡器，产生所需频率的载波信号，并保证载波信号的频率稳定度。

（4）时钟产生电路：通过分频器形成工作所需的各种时钟。

（5）微控制器：阅读器工作的核心，完成收发控制、向应答器发命令及写数据、数据读取与处理、与高层处理应用系统的通信等工作。

（6）天线：与射频标签形成耦合交联。

3）编程器

只有可读可写的标签系统才需要编程器。编程器是向标签写入数据的装置。编程器写入数据一般来说是离线（Offline）完成的，也就是预先在标签中写入数据，等到开始应用时直接把标签黏附在被标识项目上。也有一些 RFID 应用系统，写数据是在线（Online）完成的，尤其是在生产环境中作为交互式便携数据文件来处理时。

4）天线

天线是标签与阅读器之间传输数据的发射、接收装置。除了系统功率、天线的形状和相对位置影响数据的发射和接收，还需要专业人员对系统的天线进行设计、安装。

RFID 系统结构如图 3-22 所示。

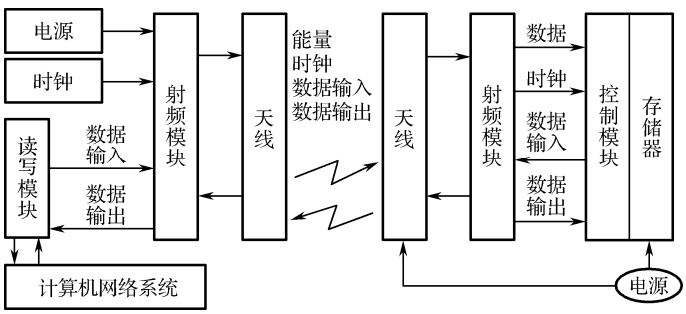


图 3-22　RFID 系统结构

2. RFID 的工作原理

射频技术的基本原理是电磁理论，利用无线电波对记录媒体进行读写。射频技术利用无线射频方式在阅读器和标签之间进行非接触双向数据传输，以达到目标识别和数据交换的目的。

射频自动识别装置发出微波查询信号时，安装在被识别物体上的标签将接收到的部分微波的能量转换为直流电，供标签内部电路工作，而将另外一部分微波通过自己的微带天线反射回标签读出装置。由标签反射回的微波信号携带了标签内部存储的数据信息。反射回的微波信号经读出装置进行数据处理后，得到标签内存储的识别代码信息。射频识别的工作原理如图 3-23 所示。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

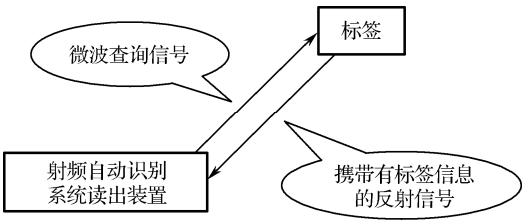


图 3-23 射频识别的工作原理

目前，RFID 已经得到了广泛应用，并且有国际标准 ISO 10536、ISO 14443、ISO 15693、ISO 18000 等。这些标准除规定了通信数据帧协议外，还着重对工作距离、频率、耦合方式等与天线物理特性相关的技术规格进行了规范。

标签与阅读器之间通过耦合元件实现射频信号的空间（无接触）耦合，在耦合通道内，根据时序关系，实现能量传递和数据交换。

图 3-24 是 RFID 系统前端原理图，主要完成能量耦合、载荷调制等功能。阅读器和标签之间的射频信号的耦合类型有电感耦合与电磁耦合两种。

仅以只读方式为例，图 3-25 表示只读被动标签与阅读器系统（LF 和 UHF），图 3-26 表示只读主动标签与阅读器系统。

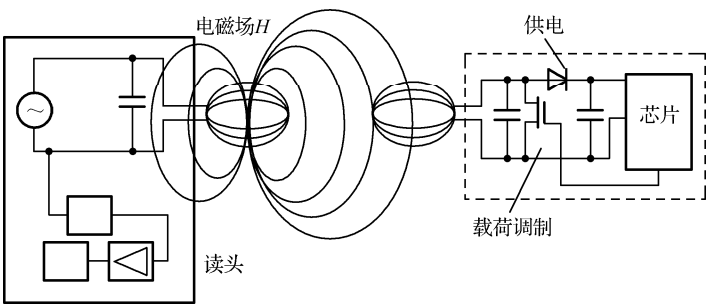


图 3-24 RFID 系统前端原理图

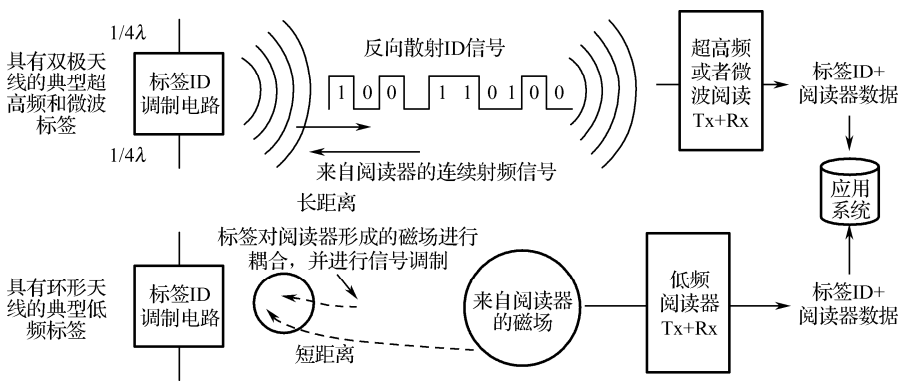


图 3-25 只读被动标签与阅读器系统

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

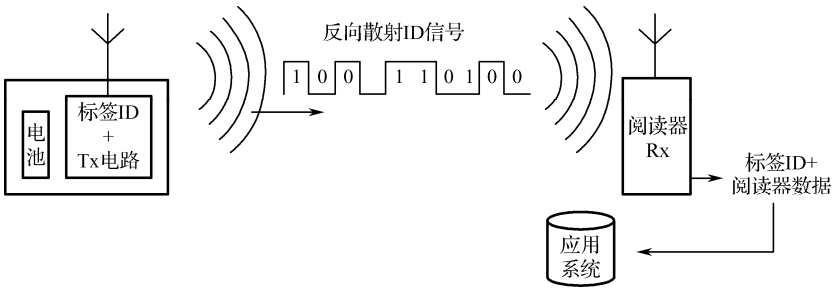


图 3-26　只读主动标签与阅读器系统

3. 分类

RFID 系统有很多不同的分类方式，一般来讲，可以按照图 3-27 所示的方式进行分类。

1）根据标签的供电方式分类

根据标签工作所需能量的供给方式的不同，RFID 系统可分为有源、无源以及半有源系统。

有源系统的标签使用标签内部的电池来供电，主动发射信号，系统识别距离较长，可达几十米甚至上百米，但其寿命有限，并且成本较高。另外，由于标签带有电池，其体积比较大，无法制成薄卡（比如信用卡标签）。有源标签的电池寿命理论上可达 5 年或者更长，但是由于电池的质量、使用环境等因素的影响，其寿命会大幅缩减。特别是在日晒等条件下使用，还有可能造成电池泄漏等。但有的有源标签制造成电池可以更换的形式，使用成本可以得到控制。

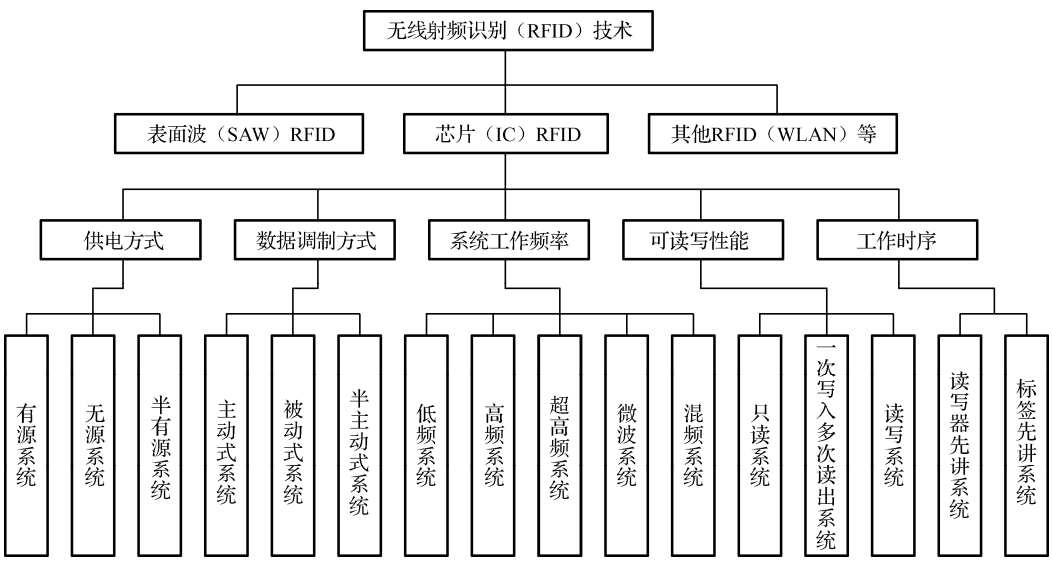


图 3-27　RFID 系统分类

无源系统的标签不含电池，利用阅读器发射的电磁波进行耦合来为自己提供能量，它的重量轻、体积小，寿命非常长，成本低廉，可以制成各种各样的薄卡或者挂扣卡。但它的识别距离受到限制，一般是几十厘米到数十米，并且需要有较大的阅读器发射功率。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

半有源系统标签带有电池，但是电池只起到对标签内部电路供电的作用，标签本身并不发射信号。

2）根据数据调制方式分类

根据数据调制方式的不同，RFID 系统可分为主动式、被动式和半主动式系统。一般来讲，无源系统为被动式，有源系统为主动式，半有源系统为半主动式。

主动式系统用自身的射频能量主动发送数据给阅读器，调制方式可为调幅、调频或调相。主动式系统标签是单向的，也就是说，只有标签向阅读器不断传送信息，而阅读器对标签的信息只是被动地接收，就像电台和收音机的关系。被动式射频系统使用调制散射方式发射数据，它必须利用阅读器的载波来调制自己的信号，在门禁或交通的应用中比较适宜，因为阅读器可以确保只激活一定范围内的射频系统。在有障碍物的情况下，采用调制散射方式，阅读器的能量必须来回穿过障碍物两次。而主动式射频标签发射的信号仅穿过障碍物一次，因此在主动方式下工作的射频标签主要用于有障碍物的应用中，距离更远，速度更快。

被动式系统标签内部不带电池，要靠外界提供能量才能正常工作。被动式系统标签典型的产生电能的装置是天线与线圈，当标签进入系统的工作区域时，天线接收到特定的电磁波，线圈就会产生感应电流，在经过整流电路时，激活电路上的微型开关，给标签供电。被动式系统标签具有永久使用期，常常用在标签信息需要每天读写或频繁读写多次的地方，而且被动式系统标签支持长时间的数据传输和永久性的数据存储。被动式系统标签的缺点主要是数据传输的距离要比主动式系统标签短。因为被动式系统标签要依靠外部的电磁感应来供电，所以它的电能就比较弱，数据传输的距离和信号强度就受到限制，需要敏感性比较高的信号接收器（阅读器）才能可靠识读。

半主动式系统也称电池支援式（Battery Assisted）反向散射调制系统。半主动式系统标签本身也带有电池，只起到对标签内部数字电路供电的作用，标签并不通过自身能量主动发送数据，只有被阅读器的能量场“激活”时，才通过反向散射调制方式传输自身的数据。

3）根据工作频率分类

根据工作频率的不同，RFID 系统可分为低频、高频、超高频、微波和混频系统。阅读器发送无线信号时所使用的频率称为 RFID 系统的工作频率，基本上可划分为低频（Low Frequency，LF，30～300kHz）、高频（High Frequency，HF，3～30MHz）、超高频（Ultra High Frequency，UHF，300～968MHz）、微波（Micro Wave，MW，2.45～5.8GHz）。低频系统一般工作在 100～300kHz，常见的工作频率有 125kHz、134.2kHz；高频系统工作在 10～15MHz，常见的工作频率为 13.56MHz；超高频工作频率为 850～960MHz，常见的工作频率为 869.5MHz、915.3MHz；还有些射频识别系统工作在 2.45GHz 的微波段。

自从 1980 年以来，低频（125～135kHz）RFID 技术一直用于近距离的门禁管理。由于其信噪比较低，识读距离受到很大限制。低频系统防冲撞性能差，多标签同时识读慢，性能也容易受到其他电磁环境的影响。13.56MHz 高频 RFID 产品可以部分地解决这些问题。

13.56MHz 高频 RFID 系统的数据读取速度较快，而且可以实现多标签同时识读，形式多样，价格适中。但是 13.56MHz 高频 RFID 产品对可导媒介（如液体、高湿、碳介质等）的穿透性不如低频产品。

860～960MHz 超高频 RFID 产品常常被推荐应用在供应链管理上，超高频产品识读距离长，能够实现高速识读和多标签同时识读。但是，超高频电磁波对于可导媒介（如水等）完

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

全不能穿透，对金属的绕射性也很差。实践证明，由于高湿物品、金属物品对超高频无线电波的吸收与反射特性，超高频 RFID 产品对于此类物品的跟踪与识读是完全失败的。

4）根据标签的可读写性能分类

根据标签的可读写性能的不同，系统可分为只读、读写和一次写入多次读出系统。

根据射频标签内部使用的存储器类型的不同分为读写（RW）标签、一次写入多次读出（WORM）标签和只读（RO）标签。RW 标签一般比 WORM 标签和 RO 标签贵得多，如信用卡等。WORM 标签是用户可以一次性写入的标签，写入后数据不能改变，WORM 标签比 RW 标签要便宜。RO 标签存有一个唯一的号码 ID，不能修改，这样既提高了安全性，价格也最便宜。

只读系统标签内部只有只读存储器（Read Only Memory，ROM）和随机存储器（Random Access Memory，RAM）。ROM 用于存储发射器操作系统程序和安全性要求较高的数据，它与内部的处理器或逻辑处理单元一起完成内部的操作控制功能，如响应延迟时间控制、数据流控制、电源开关控制等。另外，只读系统标签的 ROM 中还存储标签的标识信息。这些信息可以在标签制造过程中由制造商写入 ROM 中，也可以在标签开始使用时，由使用者根据特定的应用目的写入特殊的编码信息。这种信息可以只简单地代表二进制中的 0 或者 1，也可以像二维码那样，包含相当丰富的信息。但这种信息只能一次写入，多次读出。只读系统标签中的 RAM 用于存储标签响应和数据传输过程中临时产生的数据。另外，只读系统标签中除 ROM 和 RAM 外，一般还有缓冲存储器，用于暂时存储调制后等待天线发送的信息。

读写系统标签内部的存储器除 ROM、RAM 和缓冲存储器之外，还有非易失可编程记忆存储器。这种存储器除具有存储数据的功能外，还具有在适当的条件下允许多次写入数据的功能。非易失可编程记忆存储器有许多种，EEPROM（电可擦除可编程只读存储器）是比较常见的一种，这种存储器在加电的情况下，可以实现对原有数据的擦除和数据的重新写入。可写存储器的容量根据标签的种类和执行的标准存在较大的差异。

5）根据标签和读写器之间的工作时序分类

根据标签和读写器之间的工作时序的不同，系统可分为读写器先讲系统和标签先讲系统，即读写器主动唤醒标签（Reader Talk First，RTF）和首先自报家门（Tag Talk First，TTF）的方式。它涉及读写器和标签的工作次序问题，即时序。

对于无源标签来讲，一般是读写器先讲的形式；对于多标签同时识读来讲，可以是 RTF 方式，也可以是 TTF 方式。值得一提的是，这里多标签同时识读的“同时”只是相对的概念。为了实现多标签无冲撞同时识读，对于 RTF 方式，读写器先对一批标签发出隔离指令，使得读写器识读范围内的多个标签被隔离，最后只保留一个标签处于活动状态，并与读写器建立无冲撞的通信联系。通信结束后，发送指令使该标签进入休眠，指定一个新的标签执行无冲撞通信指令。如此反复，完成多标签同时识读。对 TTF 方式，标签在随机的时间内反复地发送自己的识别 ID，不同的标签可在不同的时间段最终被读写器正确读取，完成多标签的同时识读。与 RTF 方式相比，TTF 方式的系统通信协议比较简单，速度更快，但是如果技术处理不得当，TTF 也会带来一些诸如性能不够稳定、数据读取与写入误码率较高等不良后果。EPC 标准和 ISO 标准在 RFID 系统上主要采用无源系统标签和 RTF 方式，因此，一般的防冲撞技术都是基于无源标签和 RTF 方式的。

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

3.6.3 RFID 关键技术

RFID 关键技术主要包括产业化关键技术和应用关键技术两方面。

RFID 产业化关键技术主要包括以下几项。

（1）标签芯片设计与制造。例如，低成本、低功耗的 RFID 芯片设计与制造技术，适合标签芯片实现的新型存储技术，防冲突算法及电路实现技术，芯片安全技术，以及标签芯片与传感器的集成技术等。

（2）天线设计与制造。例如，标签天线匹配技术，针对不同应用对象的 RFID 标签天线结构优化技术，多标签天线优化分布技术，片上天线技术，读写器智能波束扫描天线阵技术，以及 RFID 标签天线设计仿真软件等。

（3）RFID 标签封装技术与装备。例如，基于低温热压的封装工艺，精密机构设计优化，多物理量检测与控制，高速高精运动控制，装备故障自诊断与修复，以及在线检测技术等。

（4）RFID 标签集成。例如，芯片与天线及所附着的特殊材料介质三者之间的匹配技术，标签加工过程中的一致性技术等。

（5）读写器设计。例如，密集读写器技术，抗干扰技术，低成本小型化读写器集成技术，以及读写器安全认证技术等。

RFID 应用关键技术主要包括以下几项。

（1）RFID 应用体系架构。例如，RFID 应用系统中各种软硬件和数据的接口技术及服务技术等。

（2）RFID 系统集成与数据管理。例如，RFID 与无线通信、传感器网络、信息安全、工业控制等的集成技术，RFID 应用系统中间件技术，海量 RFID 信息资源的组织、存储、管理、交换、分发、数据处理和跨平台计算技术等。

（3）RFID 公共服务体系。提供支持 RFID 社会性应用的基础服务体系的认证、注册、编码管理、多编码体系映射、编码解析、检索与跟踪等技术与服务。

（4）RFID 检测技术与规范。例如，面向不同行业应用的 RFID 标签及相关产品物理特性和性能一致性检测技术与规范，标签与读写器之间空中接口一致性检测技术与规范，以及系统解决方案综合性检测技术与规范等。

其中，最关键的技术就是天线技术、RFID 中间件技术以及 RFID 中的防碰撞技术与算法。

1. RFID 中的天线技术

天线技术对于 RFID 系统十分重要，天线是决定 RFID 系统性能的关键部件。RFID 天线可以分为低频、高频、超高频和微波天线，每一频段天线又分为电子标签天线和读写器天线。这两种天线按方向性可分为全向天线和定向天线等，按外形可分为线状天线和面状天线等，按结构和形式可分为环形天线、偶极天线、双偶极天线、阵列天线、八木天线、微带天线和螺旋天线等。RFID 系统可采用的天线形式多样，用以完成不同的任务。

1）RFID 天线的应用要求

（1）电子标签天线。一般来讲，RFID 电子标签天线要满足如下条件。

① RFID 天线必须足够小，从而能够附着在需要的物品上。

② RFID 天线必须与电子标签有机地结合成一体，或贴在表面，或嵌入物体内部。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

③ RFID 天线的读取距离依赖于天线的方向性，一些应用需要标签具备特定的方向性，例如，有全向或半球覆盖的方向性，以满足零售商品跟踪等需要。

④ 无论物品在什么方向，RFID 天线的极化都能与读写器的询问信号相匹配。

⑤ RFID 天线具有应用的灵活性，在各种恶劣环境和干扰下都能保证标签识别的快速无误。

⑥ RFID 天线具有应用的可靠性，保证不受温度、湿度、压力影响和在标签插入、印刷和层压处理中的存活率。

⑦ RFID 天线的频率和频带满足技术标准。

⑧ RFID 天线具有鲁棒性。

⑨ RFID 天线价格低廉。

（2）读写器天线。

① 读写器天线既可以与读写器集成在一起，也可以采用分离式。

② 读写器天线设计要求低剖面、小型化。

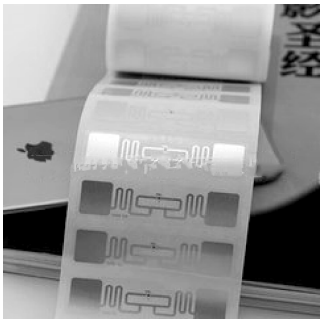
③ 读写器天线设计要求多频段覆盖。

④ 对于分离式读写器，还涉及天线阵的设计问题。

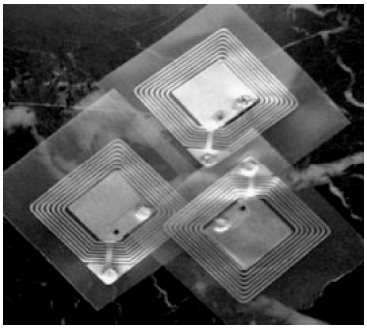
2）低频和高频 RFID 天线技术

在低频和高频频段，读写器与标签基本都采用线圈天线，线圈之间存在互感，使一个线圈的能量可以耦合到另一个线圈。读写器天线与标签天线采用近场耦合的方式，电子标签处于读写器的近区，当超出范围时，近场耦合就失去作用，开始过渡到远距离的电磁场。

（1）低频和高频 RFID 天线可以有不同的构成方式，并可以采用不同的材料，如图 3-28 所示。它们具有如下特点：天线都采用线圈的形式，线圈可以是圆形环也可以是矩形环；天线的尺寸比芯片的尺寸大得多；有些天线的基板是柔软的，适合粘贴在各种物体表面；由天线和芯片构成的电子标签可以很小，也可以批量生产。



（a）批量生产的软基板天线



（b）矩形环天线

图 3-28　低频和高频 RFID 天线

（2）低频和高频 RFID 天线的磁场。电流在周围会产生磁场，不同的电流分布，在周围会产生不同的磁感应强度。

（3）低频和高频 RFID 天线的最佳尺寸。线圈天线的最佳尺寸，是指线圈上的电流 I 为常数，并且与天线的距离 z 为常数时，线圈尺寸与磁场的关系：

$$R=\sqrt{2}z$$

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

虽然增大线圈的半径 R，会在线圈的较远处获得更大的磁场，但由上式可以看出，随着距离 z 的增大，会使磁场值减小，影响标签与读写器线圈之间的耦合强度，导致对标签能量的供给降低。

3）微波 RFID 天线技术

微波 RFID 天线技术是目前 RFID 技术最活跃和发展最迅速的领域，微波 RFID 天线和低频、高频 RFID 天线相比有本质的不同。微波 RFID 采用电磁辐射的方式工作，读写器天线与电子标签天线之间距离较远，一般超过 1m，典型值为 1～10m；微波 RFID 的电子标签较小，使天线的小型化成为设计的重点；微波 RFID 天线形式多样，可以采用对称振子天线、微带天线、阵列天线和宽带天线等；微波 RFID 天线造价低廉，因此出现了很多天线制作的新技术。

（1）微波 RFID 天线的结构。微波 RFID 天线具有如下特点：结构多样；很多天线的基板是柔软的；天线的尺寸比芯片的尺寸大很多；很多天线和芯片构成的标签能在条带上批量生产；有些天线提供可扩充装置，来提供短距离和长距离的 RFID 标签。

（2）微波 RFID 天线的设计。微波 RFID 天线的设计，需要考虑天线采用的材料、尺寸、作用距离，还需要考虑频带宽度、方向性和增益等电参数。微波 RFID 天线主要采用偶极子天线、微带天线、非频变天线和阵列天线。

偶极子天线即振子天线，是微波 RFID 常用的天线。为了缩短天线的尺寸，在微波 RFID 中偶极子天线常采用弯曲结构。弯曲偶极子天线纵向延伸方向至少折返一次，从而具有至少两个导体段，每个导体段分别有一个延伸轴，这些导体段借助一个连接段相互平行且有间隔地排列，如图 3-29 所示。

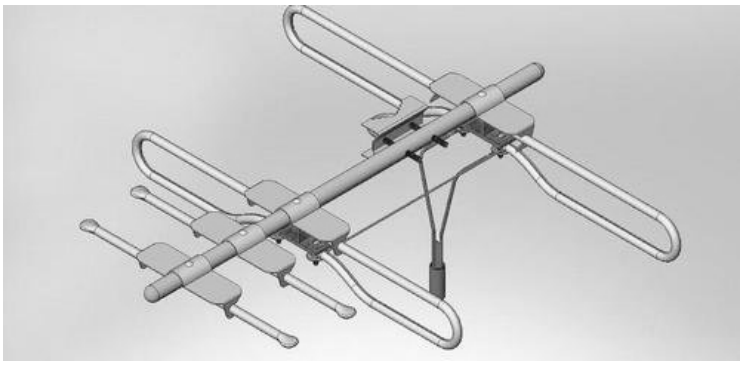


图 3-29　弯曲偶极子天线

为了更好地控制天线电阻，增加了一个同等宽度的载荷棒作为弯曲轮廓；弯曲轮廓的长度和载荷棒可以变更，以获得适宜的阻抗匹配。弯曲天线有几个关键参数，如载荷棒宽度、距离、间距、弯曲步幅宽度和弯曲步幅高度等，通过调整这些参数，可以改变天线的增益和阻抗，并改变电子标签的谐振、最高射程和带宽。

微波 RFID 常采用微带天线。微带天线属于平面型天线，具有小型化、易集成、方向性好等优点，可以做成共形天线，易于形成圆极化，制作成本低，易于大量生产。

微带天线按结构特征分类，可以分为微带贴片天线和微带缝隙天线两大类；微带天线按形状分类，可以分为矩形、圆形和环形微带天线等；微带天线按工作原理分类，可以分成谐振型（驻波型）和非谐振型（行波型）微带天线。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

阵列天线是一类由不少于两个天线单元规则或随机排列，并通过适当激励获得预定辐射特性的天线。就发射天线来说，简单的辐射源比如点源、对称振子源是常见的，阵列天线将它们按照直线或更复杂的形式，排成某种阵列的样子，构成阵列形式的辐射源，并通过调整阵列天线馈电电流、间距、长度等不同参数来获取最好的辐射方向性。

目前随着通信技术的迅速发展，以及对天线诸多研究方向的提出，诞生了很多新型天线，其中就包括智能天线。智能天线技术利用各个用户间信号空间特征的差异，通过阵列天线技术在同一信道上接收和发射多个用户信号而不发生相互干扰，使无线电频谱的利用和信号的传输更为有效。

一般来说，若天线的相对带宽达到百分之几十，这类天线称为宽频带天线；若天线的频带宽度能够达到 10∶1，这类天线称为非频变天线。非频变天线能在一个很宽的频率范围内保持天线的阻抗特性和方向特性基本不变或稍有变化。现在 RFID 使用的频率很多，这就要求一台读写器可以接收不同频率标签的信号，因此读写器发展的一个趋势是可以在不同的频率下使用，这使得非频变天线成为 RFID 的一个关键技术。

非频变天线有多种形式，主要包括平面等角螺旋天线、圆锥等角螺旋天线和对数周期天线等。

2. RFID 中间件技术

从 RFID 产业发展的角度来看，中间件是 RFID 大规模应用的关键技术，也是 RFID 产业链的高端领域。RFID 中间件是介于前端读写器硬件模块与后端应用软件之间的重要环节，是介于应用系统和系统软件之间的一类软件，通过系统软件提供基础服务，它可以连接网络上不同的应用系统，以达到资源共享、功能共享的目的。简单来说，中间件的作用就是试图通过屏蔽各种复杂的技术细节，使技术问题简单化。

1）RFID 中间件概述

（1）RFID 中间件的架构与分类。

RFID 中间件采用分布式架构，它利用高效可靠的消息传递机制进行数据交流，并基于数据通信来进行分布式系统的集成，支持多种通信协议、语言、应用程序、硬件和软件平台。RFID 中间件逻辑结构包含读写器适配层、事件管理器、应用层接口三部分。

根据中间件在系统中所起的作用和采用的技术，可以把中间件大致分为以下几种：数据访问中间件、远程过程调用中间件、面向消息中间件、面向对象中间件、网络中间件、事件处理中间件和屏幕转换中间件。

（2）RFID 中间件的特征与作用。

目前市场上出现的 RFID 中间件产品可分为非独立中间件和独立的通用中间件两大类。非独立中间件是将 RFID 技术纳入现有的中间件产品的软件系统中，RFID 作为可选项。独立的通用中间件产品不依赖于其他软件系统，各模块都由组件构成，根据不同的需要进行软件组合，灵活性高，能满足各种行业应用的需要。一般来说，RFID 中间件具有以下特征：独立架构、数据流、过程流、支持多种编程标准、状态监控和安全功能。

RFID 中间件是一种面向消息的中间件。其中，信息以消息的形式，采用异步的方式从一个程序传送到另一个或多个程序，传送者不必等待回应。它的作用主要体现在以下方面：控制 RFID 读写设备按照预定的方式工作，保证不同读写设备之间配合协调；按照一定规则过滤

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

数据，筛除绝大部分冗余数据，将真正有效的数据传送给后台信息系统；保证读写器和企业级分布式应用系统平台之间的可靠通信，为分布式环境下异构的应用程序提供可靠的数据通信服务。

2）中间件接入技术和业务集成技术

RFID 中间件是连接读写器与应用系统的纽带，其负责将原始的 RFID 数据转换为面向业务领域的结构化数据形式，发送到企业应用系统中供其使用，同时负责多类型读写设备的即插即用，实现多设备间的协同。从中间件的体系结构上来看，它分为边缘层和业务集成层两部分。边缘层是一种位置相对靠近 RFID 读写器的逻辑层，负责 RFID 读写设备的接入和管理，通过采用 RFID 中间件的接入技术，边缘层可实现对不同种类的读写器进行参数设置。边缘层还负责过滤和消减海量 RFID 数据、处理 RFID 复杂事件，这样可以防止大量无用数据流入系统。RFID 标签数据通过边缘层过滤和消减，以一定的格式发送到业务集成层，业务集成层是指 RFID 中间件与应用系统的衔接部分。通过采用 RFID 中间件业务集成技术，业务集成层可以将各个企业的业务流程关联在一起，形成基于 RFID 技术的业务流程自动化。RFID 设备与中间件集成架构如图 3-30 所示。

（1）RFID 读写器设备接入技术。RFID 读写器类型千差万别，读写器开发商提供的读写设备开发包多种多样。一方面，根据 RFID 读写设备不同的硬件特征，设备连接构件与读写设备的连接方式分为网口连接、串口连接和 USB 连接。另一方面，针对不同厂商提供的不同开发包，设备连接构件与读写设备接入方式分为 JAR 包开发、DLL 开发以及串口命令开发。因此，与 RFID 读写器的连接需要选择不同的连接方式，采用不同的连接技术。通过屏蔽 RFID 读写设备的多样性和复杂性，能够为后台业务系统提供强大的支撑，实现各种各样读写设备快速良好地接入中间件系统，从而驱动更丰富的 RFID 应用。

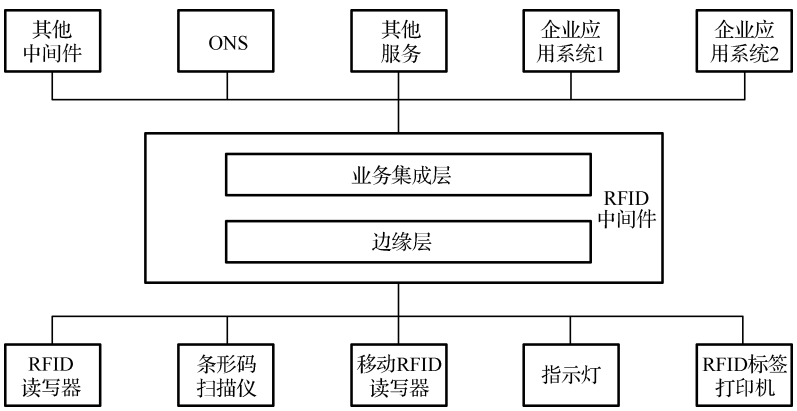


图 3-30 RFID 设备与中间件集成架构

通过 RFID 设备接入技术，主要实现以下功能：对 RFID 读写设备的发现和重新配置；当有新的读写设备加入网络时，必须能够发现这些新的读写设备，给新的读写设备分配任务，并将它们加入现有的系统。

（2）RFID 中间件业务集成技术。RFID 业务集成是将各企业的业务流程关联在一起，实现基于 RFID 技术的业务流程自动化。通过对 RFID 消息的处理，将供应链关联、企业资源计划、客户关系管理等企业信息系统连接起来，使得各企业系统不仅能够实时、快速地获取物

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

理信息，也能够在各企业系统业务流之间高效地协同，从而使企业的信息系统有效地集成在一起，达到提高企业运作效率的目的。

RFID 中间件业务集成平台是企业间基于 RFID 技术进行业务集成的公共基础设施，是可定制、可裁剪、可配置的综合平台。通过灵活易用的平台配置，可以消除集成过程中繁杂的定制开发，为基础 RFID 业务流程的集成提供必要的支撑环境，是整个 RFID 业务集成的核心。RFID 中间件可在多个平台层次上进行集成，RFID 中间件业务集成平台包括数据层集成、功能层集成、事件层集成、总线层集成、业务层集成和服务层集成。通过启用服务总线、事件处理网络和基于 XML 的信息传输，RFID 中间件业务集成平台为多标准、多协议 RFID 设备和异构系统平台提供一种可靠灵活的基础。RFID 中间件业务集成平台具有的灵活升级、定制裁剪、按需扩展等特性，从整体上保证了平台设计的灵活性和扩展性。

3）RFID 中间件的结构

RFID 中间件的结构包括读写器接口（Reader Interface）、处理模块（Processing Module）以及应用接口（Application Interface）三部分。读写器接口负责前端和相关硬件的连接；处理模块主要负责读写器监控、数据过滤、数据格式转换、设备注册；应用接口负责后端与其他应用软件的连接。中间件的结构框架如图 3-31 所示。

RFID 中间件处理模块的主要作用是负责数据接收、数据处理和数据转换，同时还具有对读写器的工作状态进行监控，读写器的注册、删除、群组等功能，它是 RFID 中间件的核心模块。RFID 中间件处理模块由 RFID 事件过滤系统、实时内存事件数据库和任务管理系统三部分组成。

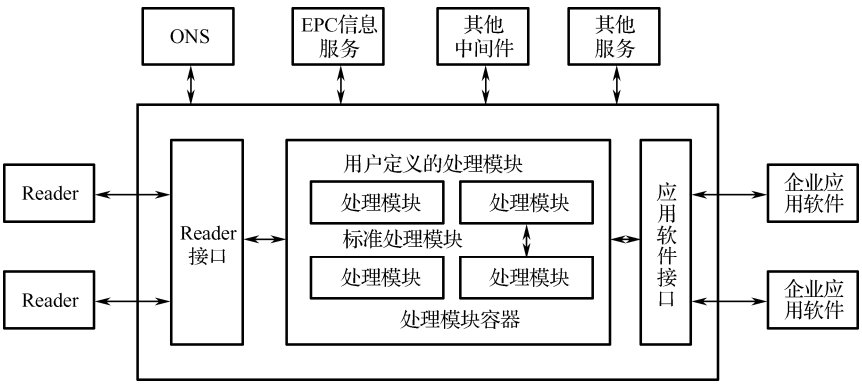


图 3-31　中间件的结构框架

RFID 事件过滤系统（RFID Event Management System，RFID EMS）可以与读写器应用程序进行通信，过滤读写器发送的事件流。在中间件系统中，RFID EMS 是最重要的组件，它为用户提供了集成其他应用程序的平台。RFID EMS 支持多种读写器协议，RFID EMS 读取的事件能够在满足中间件要求的基础上被过滤。RFID EMS 可以采集、缓冲、平滑和组织从读写器获得的信息，读写器每秒可以上传数百个事件，每个事件都能在处理中间件请求的基础上被恰当地缓冲、过滤和记录。

实时内存事件数据库（Real-time In-memory Event Database，RIED）是一个用来保存 RFID 边缘中间件信息的内存数据库。RFID 边缘中间件保存和组织读写器发送的事件。RFID 事件管

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

理系统通过过滤和记录事件的框架，可以将事件保存在数据库中。但是，数据库不能在一秒内处理几百次以上的交易。实时内存事件数据库提供了与数据库一样的接口，但其性能要好得多。

任务管理系统（Task Management System，TMS）负责管理由上级中间件或企业应用程序发送到本级中间件的任务。一般情况下，任务可以等价为多任务系统中的进程，TMS 管理任务类似于操作系统管理进程。传输到 TMS 的任务可以获得中间件的所有便利条件，TMS 可以完成企业的多种操作，具有数据交互、PML 查询、删除任务进度、值班报警以及远程数据上传等功能。

思考与练习

1．自动识别技术的主要特征有哪些？
2．在生物识别技术中，用来鉴别身份的生物特征应该具有哪些特点？
3．简述生物识别技术的分类。
4．简述磁卡识别技术和 IC 卡识别技术的主要特点。
5．简述 OCR 技术的主要特点和应用领域。
6．请概括出 OCR 识别处理的主要过程。
7．为什么说 RFID 技术是物联网感知层的关键技术之一？
8．简述条形码的识别原理。
9．简述条形码的结构。
10．比较 RFID 技术和条形码技术的优缺点。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

第4章

传感器网络技术

【学习要求】

（1）了解无线传感器网络的基本知识、体系结构和发展。

（2）掌握无线传感器网络的路由协议和 MAC 协议。

（3）掌握 Bluetooth 技术、ZigBee 技术、Wi-Fi 技术、NFC 技术等相关技术。

4.1 无线传感器网络概述

无线传感器网络（Wireless Sensor Networks，WSN，简称无线传感网或传感网）是信息科学领域中一个全新的发展方向，同时也是新兴学科与传统学科进行领域间交叉的结果。无线传感器网络经历了智能传感器、无线智能传感器、无线传感器网络三个阶段。智能传感器将计算能力嵌入传感器中，使得传感器节点不仅具有数据采集能力，而且具有信息处理能力；无线智能传感器在智能传感器的基础上增加了无线通信能力，大大延长了传感器的感知触角，降低了传感器的工程实施成本。无线传感器网络将网络技术引入无线智能传感器中，使得传感器不再是单个的感知单元，而是能够交换信息、协调控制的有机体，实现物与物的互联，使感知触角深入世界各个角落，成为下一代互联网及物联网的重要组成部分。

目前，无线传感器网络得到学术界、工业界和政界的广泛关注，成为在国防军事、环境监测和预报、健康护理、智能家居、建筑物结构监控、复杂机械监控、城市交通、空间探索、生产和仓库管理、机场、工业园区的监测管理等众多领域中最有竞争力的应用前沿技术。

随着微机电系统、片上系统（System on Chip，SoC）、无线通信和低功耗嵌入式技术的飞速发展，无线传感器网络将以其低功耗、低成本、分布式和自组织等特点带动信息感知的变革。

4.1.1 无线传感器网络的系统结构和节点

1. 无线传感器网络结构

现代信息技术的基础是传感器技术、通信技术、计算机技术，分别完成信息采集、传输和处理。无线传感器网络将这些技术结合在一起，实现信息采集、传输和处理的一体化与自动化。

无线传感器网络由部署在监测区域内、具有无线通信与计算能力的大量的廉价微型传感器节点组成，通过自组织方式构成能够根据环境完成指定任务的分布式、智能化网络系统。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

无线传感器网络的节点间一般采用多跳（Multi-hop）方式进行通信。其节点协作监控不同位置的对象及环境状况（如温度、湿度、声音、压力或污染物等）。

传感器网络通过一组传感器以特定方式构成有线或无线网络，使各节点能协作感知、采集和处理网络覆盖范围内感知对象信息，并发布给观控者。典型的无线传感器网络系统结构如图 4-1 所示。

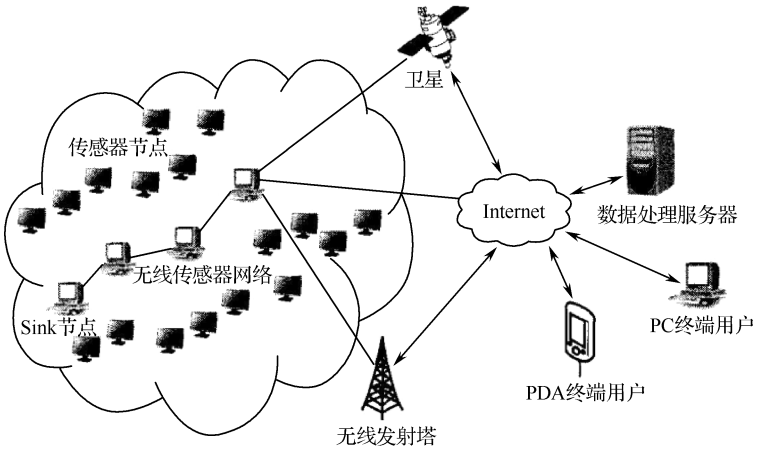


图 4-1　典型的无线传感器网络系统结构

2. 传感器节点

无线传感器网络以各种节点为核心。网络的构建必须具备三个要素：

（1）感知对象。需要被感知的任何事物或环境参数。

（2）感知节点。既有感知功能，也有路由选择功能，用于检测周围事件或环境参数。

（3）汇聚节点。即 Sink 节点，从传感器节点采集并处理检测数据。

无线传感器网络可在独立环境下运行，也可以通过网关连接到主干网络，通过自组织无线通信网络以多跳中继方式将所感知的信息传送到用户终端。

节点单元功能结构如图 4-2 所示。

（1）感知单元。由传感器和 A/D 组成，用于感知、获取信息，将其转换为数字信号。

（2）处理单元。由处理器、存储器、嵌入式操作系统等构成，负责协调节点各部分工作，如对感知单元获取的信息进行处理、保存，控制感知单元和电源的工作模式等。

（3）通信单元。由收发器构成，负责与其他传感器或收发器进行通信。

（4）电源部分。为传感器工作提供必要的能源。

（5）定位系统。用于观察者对传感器的位置进行跟踪。

（6）移动系统。用于在执行特定任务时，移动传感器节点。

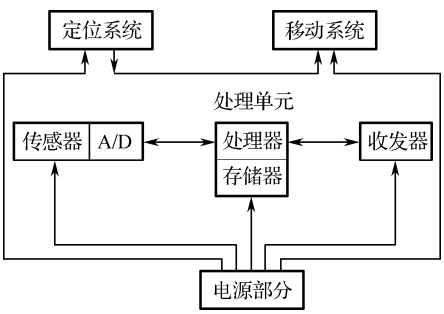


图 4-2　节点单元功能结构

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

节点在无线传感器网络中可作为数据采集者、数据中转站或簇头节点。作为数据采集者，它收集周围环境数据，通过通信路由协议直接或间接地将数据传递给远方基站或 Sink 节点；作为数据中转站，除完成数据采集任务以外，还要接收邻节点的数据，将其发送给距离基站更近的邻节点或直接发送到基站或 Sink 节点；作为簇头节点，负责收集该簇内所有节点采集到的数据，经过数据融合后，发送到基站或 Sink 节点。

3. 无线传感器网络的通信体系

通信是无线传感器网络的关键，结合网络层次架构、管理与功能，要对每个节点进行节点定位、传输控制、时间同步、网络管理、接口管理、能源管理等，构成通信体系，如图 4-3 所示。

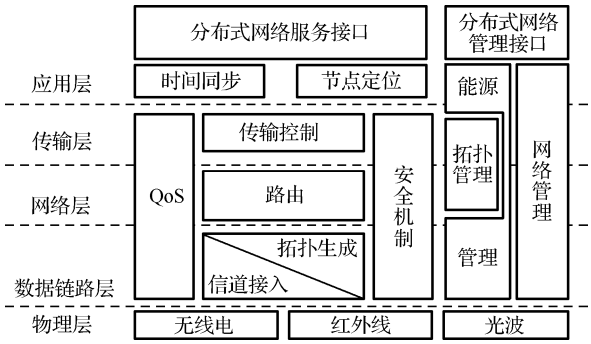
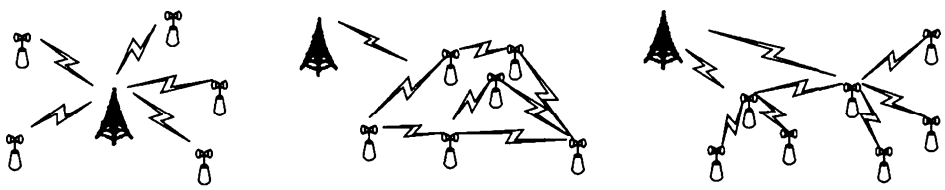


图 4-3　无线传感器网络的通信体系

4.1.2　无线传感器网络的结构和部署

1. 无线传感器网络的拓扑结构

无线传感器网络的拓扑结构有三种：星状网、网状网和混合网，如图 4-4 所示。每种拓扑结构都有各自的优点和缺点，具体如下。



（a）星状网络拓扑结构　（b）网状网络拓扑结构　（c）混合网络拓扑结构

图 4-4　无线传感器网络的拓扑结构

1）星状网

星状网的拓扑结构是单跳（Single-hop）。在传统无线网络中，所有终端节点直接与基站进行双向通信，而彼此间不进行连接。基站节点可用一台 PC、专用控制设备或其他数据处理设备作为通信网关，各终端节点也可按应用需求而各不相同。这种结构对传感器网络并不合适，因为传感器自身能量有限，如果每个节点都要保证数据的正确接收，则传感器节点需要以较大功率发送数据。此外，当节点之间距离较近时，会监测到相似或相同的信息，这些不必要

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

的冗余会增加网络负载。

2）网状网

网状网采用多跳的结构，所有节点都可直接通信。通过一定的算法，网络选择一条或多条路由进行多跳数据传输。由于每个传感器节点都有多条路径可到达基站节点，因此其故障修复能力较强，系统以多跳代替了单跳传输，减少了每一个传感器节点发送数据所需的功率。然而由于网络节点数量较多，分布随机且拓扑结构变化复杂，因此在网络中进行多跳路由查找以及路由维护和修复非常困难。同时，传感器节点必须时刻保持“监听”状态，相应增加了网络能耗，缩短了网络寿命。

3）混合网

混合网拓扑结构力求兼具星状网的简洁、易控以及网状网的多跳和自愈的优点，使得整个网络的建立、维护及更新更加简单、高效。其中，分层式网络结构属于混合网中比较典型的一种，尤其适合节点众多的无线传感器网络的应用。在分层网中，整个传感器网络形成分层结构，传感器节点通过基站指定或自组织的方法形成各个独立的簇（Cluster），每个簇选出相应的簇首（Cluster Head），由簇首负责簇内所有节点的控制，并对簇内所收集的信息进行整合、处理，随后发送给基站。分层式网络结构既通过簇内控制，减少了节点与基站间远距离的信令交互，降低了网络建立的复杂度，减少了网络路由和数据处理的开销，同时又可通过数据融合降低网络负载，而多跳也减少了网络的能量消耗。

2. 无线传感器网络的部署

在无线传感器网络中，传感器节点可通过飞机播撒、人工安装等方式部署在感知对象内部、附近或周边等。这些节点通过自组织或设定方式组网，以协作方式感知、采集和处理覆盖区域内特定的信息，实现对信息在任意地点、任意时间的采集、处理和分析，并以多跳中继的方式将数据传回汇聚节点。它具有快速部署、易于组网、不受有线网络束缚、适应恶劣环境等优点。

通常，无线传感器网络的部署有两种：

（1）随机性部署。以撒布方式部署，节点随机分布，以 Ad-Hoc 方式进行工作。

（2）确定性部署。预先确定部署方案和节点位置，路由预先选定。

无线传感器网络节点结构设计也可从以下两方面考虑：

（1）同构。所有的传感器网络节点具有相同的运算、存储能力和能量。

（2）异构。传感器网络节点具有不同的能力和重要性。

4.1.3　无线传感器网络协议规范

无线传感器网络协议一般包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层协议，总体架构如图 4-5 所示。在具体应用中，相应的协议标准层次架构也可略有差异。

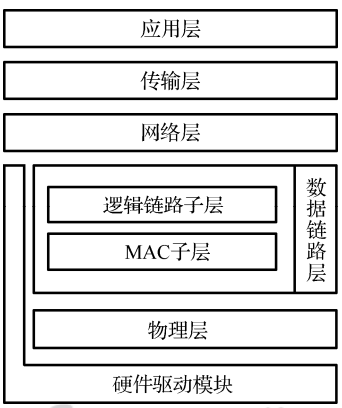


图 4-5　无线传感器网络总体架构

1. 物理层

物理层通信协议主要解决传输介质、传输频段的选择，无

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

线收发器的设计，调制方式等问题。无线传感器网络使用的传输介质主要包括无线电、红外线、光波等。无线电是最主要的传输介质，使用这种介质需要解决频段选择、调制方式选择等问题。

2. 数据链路层

数据链路层分为逻辑链路子层和 MAC 子层。

1）*逻辑链路子层*

这是数据链路层的上层部分，它为网络层提供统一接口。该子层通过在 IP 包上加上 8 位目的地址服务接入点和源地址服务接入点来保证在不同类型网络中传输。还有一个 8 位或 16 位的控制字段用于流控制等辅助功能。

2）MAC *子层*

无线传感器网络的 MAC 协议旨在为资源（特别是能量）受限的大量传感器节点建立具有自组织能力的多跳通信链路，实现公平的通信资源共享，处理数据包之间的碰撞，重点是如何节能。

数据链路层的 MAC 协议又包括以下几种。

（1）基于随机竞争的 MAC 协议。这类协议周期性地侦听/睡眠，节点尽可能处于睡眠状态，降低能耗。通过睡眠调度机制减少节点空闲侦听时间；通过流量自适应侦听机制，减少消息传输延迟；根据流量动态调整节点活动时间，用突发方式发送信息，减少空闲侦听时间。

（2）基于 TM（时分多址）的 MAC 协议。将所有节点分成多个簇，每簇有簇头，为簇内所有节点分配时槽，收集和处理簇内节点传来的数据，发送给 Sink 节点。也可将一个数据传输周期分为调度访问阶段和随机访问阶段。前者由多个连续的数据传输时槽组成，每个时槽分给特定节点，用来发送数据；后者由多个连续的信令交换时槽组成，用于处理节点的添加、删除及时间同步等。

3. 网络层

网络层路由协议主要包括基于聚簇的路由协议、基于地理位置的路由协议、能量感知路由协议、以数据为中心的路由协议等。

（1）基于聚簇的路由协议。根据规则把所有节点分为多个子集，各集为一个簇，由簇头负责全局路由，其他节点通过簇头接收或发送数据。

（2）基于地理位置的路由协议。使各节点都知道自己及目标节点的位置的协议。

（3）以数据为中心的路由协议。Sink 节点用洪泛方式将消息（监测数据）传播到整个或部分区内的节点。传播中，协议在每个节点上建立反向的从数据源到 Sink 节点的传输路径，再把数据沿已确定的路径向 Sink 节点传送。该类协议的能量和时间开销大。

（4）能量感知路由协议。在源节点和目标节点间建立多条通信路径，各路径具有一个与节点剩余能量相关的选择概率，当源节点向目标节点传输数据时，协议根据路径的选择概率选择一条路径传输。

在设计路由协议时要考虑节能与通信服务质量的平衡，以及如何支持拓扑结构频繁改变、如何面向应用设计路由协议等问题。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

4. 传输层

这里的传输层与传统网络的传输层担负的任务大致相同，负责端到端的传输控制。无线传感器网络与互联网或其他网络相连时，传输层协议尤其重要。因无线传感器网络的能量受限性、节点命名机制、以数据为中心等特征，使其传输控制较困难，故其传输层需要特殊的技术和方法。

5. 应用层

应用层位于模型的最高层，为各类应用软件提供各种面向作业的支持。相应的协议主要针对各网络节点与应用层软件之间的通信以及中间服务与应用层软件之间的通信，最终实现各种感知信息、应用信息、控制信息和管理信息等的有序使用。

4.2 IEEE 802.15.4 无线个人局域网技术

1. IEEE 简介

IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers，电子和电气工程师协会）在 1963 年由 AIEE（美国电气工程师学会）和 IRE（美国无线电工程师学会）合并而成，是世界上最大的专业技术组织之一，拥有来自 175 个国家的 36 万会员。IEEE 定位在“科学和教育，并直接面向电子电气工程、通信、计算机工程、计算机科学理论和原理研究的组织，以及相关工程分支的艺术和科学”。IEEE 定义的标准对全球工业界，特别是电子电气与电工领域等有举足轻重的影响。

2. IEEE 802.15.4

1）IEEE 802.15.4 网络简介

IEEE 802.15.4 网络是指在一个 POS 内使用相同无线信道并通过 IEEE 802.15.4 标准相互通信的一组设备的集合，又名 LR-WPAN。在这个网络中，根据设备所具有的通信能力，可以分为全功能设备（Full-Function Device，FFD）和精简功能设备（Reduced-Function Device，RFD）。FFD 之间以及 FFD 与 RFD 之间都可以通信。RFD 之间不能直接通信，只能与 FFD 通信，或者通过一个 FFD 向外转发数据。这个与 RFD 相关联的 FFD 称为该 RFD 的协调器（Coordinator）。RFD 主要用于简单的控制应用，如灯的开关、被动式红外线传感器等，传输的数据量较少，对传输资源和通信资源占用不多，因此可以采用非常廉价的实现方案。

IEEE 802.15.4 网络中，有一个被称为 PAN 网络协调器（PAN Coordinator）的 FFD，是 LR-WPAN 中的主控制器。PAN 网络协调器（以下简称网络协调器）除直接参与应用以外，还要完成成员身份管理、链路状态信息管理以及分组转发等任务。

无线通信信道是动态变化的。节点位置或天线方向的微小改变、物体移动等周围环境的变化都有可能引起通信链路信号强度和质量的剧烈变化，因而无线通信的覆盖范围不是确定的。这就造成了 LR-WPAN 中设备的数量以及它们之间关系的动态变化。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2）IEEE 802.15.4 标准概述

随着通信技术的迅速发展，人们提出了在人自身附近几米范围之内通信的需求，这样就出现了个人区域网络（Personal Area Network，PAN）和无线个人区域网络（Wireless Personal Area Network，WPAN）的概念。WPAN 为近距离范围内的设备建立无线连接，把几米范围内的多个设备通过无线方式连接在一起，使它们可以相互通信甚至接入 LAN 或 Internet。1998 年 3 月，IEEE 802.15 工作组成立。这个工作组致力于 WPAN 的物理层（PHY）和媒体访问层（MAC）的标准化工作，目标是为在个人操作空间（Personal Operating Space，POS）内相互通信的无线通信设备提供通信标准。POS 一般是指用户附近 10m 左右的空间范围，在这个范围内用户可以是固定的，也可以是移动的。

在 IEEE 802.15 工作组内有四个任务组（Task Group，TG），分别制定适合不同应用的标准。这些标准在传输速率、功耗和支持的服务等方面存在差异。下面是四个任务组各自的主要任务。

（1）TG1：制定 IEEE 802.15.1 标准，又称蓝牙无线个人区域网络标准。这是一个中等速率、近距离的 WPAN 网络标准，通常用于手机、PDA 等设备的短距离通信。

（2）TG2：制定 IEEE 802.15.2 标准，研究 IEEE 802.15.1 与 IEEE 802.11（无线局域网标准，WLAN）的共存问题。

（3）TG3：制定 IEEE 802.15.3 标准，研究高传输速率无线个人区域网络标准。该标准主要考虑无线个人区域网络在多媒体方面的应用，追求更高的传输速率与服务品质。

（4）TG4：制定 IEEE 802.15.4 标准，针对低速无线个人区域网络（Low-Rate Wireless Personal Area Network，LR-WPAN）制定标准。该标准把低能量消耗、低速率传输、低成本作为重点目标，旨在为个人或者家庭范围内不同设备之间的低速互联提供统一标准。任务组 TG4 定义的 LR-WPAN 的特征与传感器网络有很多相似之处，很多研究机构把它作为传感器的通信标准。LR-WPAN 是一种结构简单、成本低廉的无线通信网络，它使得在低电能和低吞吐量的应用环境中使用无线连接成为可能。与 WLAN 相比，LR-WPAN 只需要很少的基础设施，甚至不需要基础设施。IEEE 802.15.4 标准为 LR-WPAN 制定了物理层和 MAC 子层协议。IEEE 802.15.4 标准定义的 LR-WPAN 具有如下特点：

① 在不同的载波频率下实现了 20kbps、40kbps 和 250kbps 三种传输速率；

② 支持星状和点对点两种网络拓扑结构；

③ 有 16 位和 64 位两种地址格式，其中 64 位地址是全球唯一的扩展地址；

④ 支持冲突避免的载波多路侦听技术（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance，CSMA-CA）。

4.3 Bluetooth 技术

1. 概述

Bluetooth（蓝牙）是一种设备间短距离的无线通信技术，也是一种无线数据与语音设备通信的开放性全球标准，它以低成本、近距离无线连接为基础，实现众多设备间的无线信息交换。蓝牙程序写在一个 $9mm^2$ 的芯片中。该技术能有效简化各类移动设备间、设备与互联网间

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

的通信，使数据传输变得更迅速高效。

蓝牙技术（图 4-6）采用分散式网络结构，支持点对点及点对多点通信，采用时分双工传输方案实现全双工传输，能在近距离内廉价地将几台数字化设备（如数字照相机、数字摄像机、各种家电与自动化设备等）无线组网。

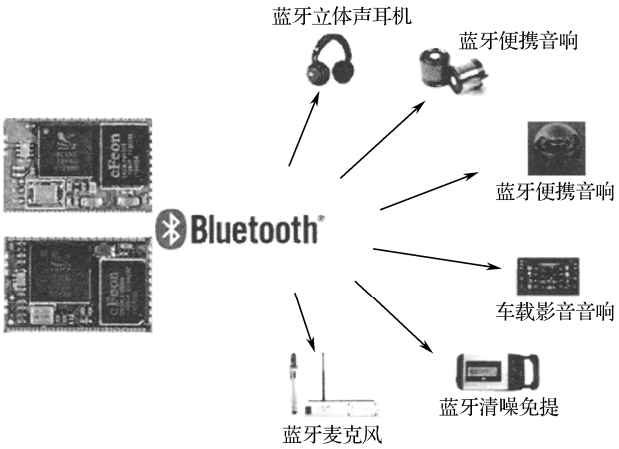


图 4-6　蓝牙技术

蓝牙是由东芝、爱立信、IBM、Intel 和诺基亚于 1998 年提出的近距离无线数字通信技术标准，目标是实现最高数据传输速率 1Mbps（有效传输速率 721kbps）、最大传输距离 10m，其上可设立 79 个带宽为 1MHz 的信道，用每秒钟切换 1600 次的频率、滚齿方式的频谱扩散技术来实现电波收发。

2. 蓝牙的技术优势

（1）全球可用。蓝牙已全球普及，许多制造商都在其产品中积极采用。蓝牙运行的 2.4GHz 波段为无须申请许可证的波段，其使用不用支付相关费用。

（2）设备多样。集成蓝牙的产品从手机、汽车到医疗设备等，用户从消费者、服务机构到生产企业等。低功耗、小体积及低成本的芯片解决方案使其可用于微小设备中。

（3）易于使用。蓝牙是一项即时技术，它不要求固定的基础设施，易于安装设置。用户只要检查配置，将其连接至使用同一配置文件的蓝牙设备即可，后续 PIN 码流程就如操作 ATM 机一样简单。用户可以用个人局域网（PAN）方式与设备和其他网络连接。

（4）规格通用。蓝牙是当今市场上支持最广、功能最丰富且安全的无线通信方式，全球范围内的认证程序可测试各成员的产品是否符合标准。

3. 蓝牙的应用场所

（1）居家。蓝牙设备可使居家办公更轻松，还能使家庭娱乐更便利：用户可在 10m 内无线控制 PC 或 iPod 中的音频文件。蓝牙还可用在适配器中，实现从相机、手机、PDA 等向电视发送照片等。

（2）办公室。传统办公室中各种电线纠缠不清，工作环境杂乱。蓝牙技术可使室内各类设备无线连接，用户启用蓝牙设备能创建即时网络，连接各种设备，创建智能办公环境。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

（3）途中。蓝牙手机、PDA、iPod 和音视设备等均能在旅途中免费通信，让用户在热点范围或有线连接之外仍能与互联网连接。各类便携设备可通过蓝牙手机和移动网络连接到互联网，即使在途中也能高效工作。目前应用最广的有手机蓝牙耳机、车载免提蓝牙话筒等。同时，蓝牙耳机的电磁波辐射量比手机低，减少了电磁波对人体的影响。

（4）娱乐。内置蓝牙技术的游戏设备，能让用户在地下通道、机场、公交车上或起居室中开展游戏竞技，欣赏音视频等。

4. 蓝牙技术规范与特点

蓝牙的标准是 IEEE 802.15，工作在 2.4GHz 的 ISM 频段，带宽为 1Mbps，以高速跳频和时分多址方式进行全双工通信，其基带协议是电路交换和分组交换的组合。一个跳频频率发送一个同步分组，每个分组占用一个时隙，使用扩频技术也可扩展到 5 个时隙。同时，蓝牙技术支持 1 个异步数据通道或 3 个并发的同步话音通道，或 1 个同时传送异步数据和同步话音的通道。每个话音通道支持 64kbps 的同步话音；异步通道支持最大速率为 721kbps，反向应答速率为 57.6kbps 的非对称连接，或 432.6kbps 的对称连接。

依据发射输出电平功率不同，蓝牙传输有 3 种距离等级：Class 1 为 100m 左右，Class 2 约为 10m，Class 3 为 2～3m。一般情况下，其正常工作半径为 10m，在此区域内，可进行多设备间的互联。

5. 蓝牙匹配规则

蓝牙设备通信前，必须进行匹配，以使其中一个设备发出的数据信息只会被允许的另一个设备所接收。蓝牙技术将设备分为两种：装有主蓝牙模块的设备（主设备）和装有从蓝牙模块的设备（从设备）。

主设备有输入端，匹配时，用户通过输入端输入随机的匹配密码来匹配两个设备。蓝牙手机、装有蓝牙模块的 PC 等都是主设备。例如，蓝牙手机与蓝牙 PC 匹配时，用户可在蓝牙手机上任意输入一组数字，再在蓝牙 PC 上输入相同的一组数字，实现两设备间的匹配。

从设备一般不具备输入端。设备出厂时，在其蓝牙芯片中固化一个 4 或 6 位数字的匹配密码。蓝牙耳机、UD 数码笔都是从设备。例如，蓝牙 PC 与 UD 数码笔匹配时，用户将笔上的蓝牙匹配密码输入蓝牙 PC，实现两者间的匹配。

主设备之间、主从设备之间可匹配，但从设备间无法匹配。一个主设备可匹配一个或多个从设备，如一个蓝牙手机可匹配 7 个蓝牙设备，而一台蓝牙 PC 可匹配十多个蓝牙设备。同一时间，蓝牙设备间只支持点对点通信。主从蓝牙模块间的匹配流程如图 4-7 所示。

6. 蓝牙的市场

1999 年至 2014 年 4 月，蓝牙产品总出货量已超过 90 亿件，预计 2019 年总出货量将达 320 亿件。除键盘、耳机、音箱等传统蓝牙周边产品外，各种心率监测计、运动腕带、活动监测计和计步器等运动保健及个人便携医疗电子产品，都可通过智能手机、平板电脑等智能终端来控制，成为新型周边设备。蓝牙正是这些新产品与智能终端的主要连接方式。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

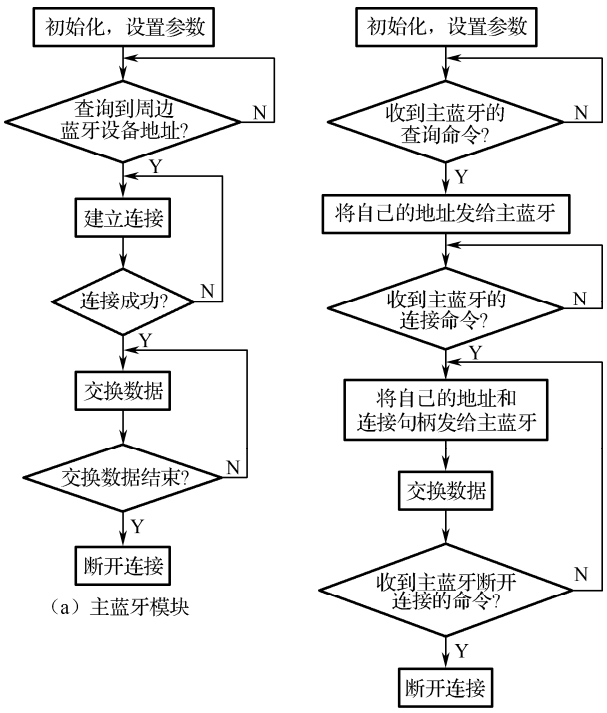


图 4-7　主从蓝牙模块间的匹配流程

4.4　ZigBee 技术

1. ZigBee 概述

ZigBee 这一名称源于蜜蜂以 Zigzag 舞来传递消息，故又称“紫蜂”。ZigBee 是一种近距离、低成本、低复杂度、低功耗、低速率、高可靠的无线数据传输技术，适用于自动控制和远程控制领域，可嵌入各种设备，支持地理定位功能。

ZigBee 以 IEEE 802.15.4 协议为基础，采用调频和扩频技术，可工作在全球免费的 2.4GHz、868MHz（欧洲）和 915MHz（北美）这三个频段上，并且在这三个频段上分别具有 250kbps、20kbps 和 40kbps 的最高数据传输速率。在 2.4GHz 频段，ZigBee 的室内传输距离为 10m，室外可达 200m 至数千米；使用其他频段时，室内传输距离为 30m，室外可达 1000m，实际传输距离将根据发射功率的大小而定。

ZigBee 是一个可由多达 65000 个无线数据传输模块组成的无线网络平台，在整个网络范围内，每个网络模块间可以相互通信。由于采用较低的传输速率和容量更小的单元，且 ZigBee 模块在未使用时处于休眠状态，因此总体功耗较低。ZigBee 节点模块如图 4-8 所示。

2. ZigBee 架构

ZigBee 组网方式类似于移动通信 GSM 网或 CDMA 网，其数据传输模块类似于移动网络

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

基站，在网络内，它们相互通信。ZigBee 网络还可以与其他网络连接。而与 GSM 网或 CDMA 网不同的是，ZigBee 网络主要是为自动感测与控制数据传输而建立的，它必须简单、方便、可靠且廉价；而 GSM 网或 CDMA 网主要是为语音通信建立的，每个基站价值一般都在百万元人民币以上，而每个 ZigBee“基站”却不到 1000 元人民币。

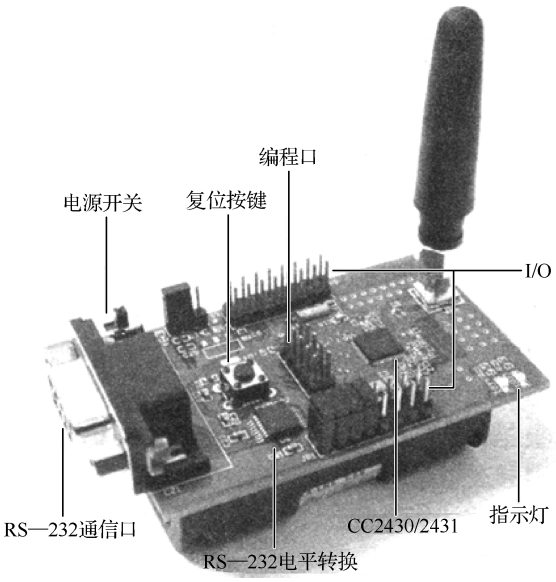


图 4-8　ZigBee 节点模块

ZigBee 网络节点（FFD）不仅本身可以与监控对象（例如传感器）连接进行数据采集和监控，还可以中转别的网络节点传输过来的数据。此外，ZigBee 网络节点还可在自己信号覆盖范围内，与多个不承担网络信息中转任务的孤立子节点（RFD）无线连接。

每个 ZigBee 网络节点（FFD 和 RFD）可以支持多达 31 个传感器和受控设备，每一个传感器和受控设备可以有 8 种不同的接口方式，可以采集和传输数字量和模拟量。

3. ZigBee 读写设备

ZigBee 读写器是短距离、多点、多跳无线通信产品，能简单、快速地为串口终端设备增加无线通信能力，最高识别速度可达 200km/h，可同时识别 200 张标签，具有性能稳定、工作可靠、信号传输能力强、使用寿命长等优势。

4. ZigBee 的自组织网络通信方式

自组织网络可举例说明：当一队伞兵空降后，每人持有一个 ZigBee 模块终端，只要他们彼此在模块的通信范围内，通过模块间彼此自动寻找与识别，很快就可形成一个互联互通的 ZigBee 网络。随着伞兵队的移动，队员间的联络还会变化，模块间还可通过重新搜索通信对象，重建彼此间的联络，刷新原有网络并保持其通信，这就是自组织网络。

5. ZigBee 协议栈架构

ZigBee 协议栈采用 OSI 分层结构，包括物理层、媒体接入层、链路层、网络层、应用层

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IN

（或应用汇聚层）、用户应用程序层。ZigBee 协议栈的体系结构如图 4-9 所示。

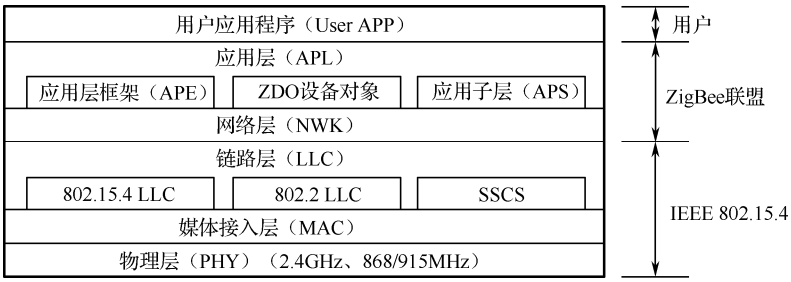


图 4-9　ZigBee 协议栈体系结构

图 4-9 中，每层之间通过服务访问点（Service Access Point，SAP）连接，每一层都通过 SAP 调用下层为本层提供服务，并通过本层与上层的 SAP 为上层服务。结合图 4-9 对 ZigBee 协议栈体系各层功能简介如下。

（1）物理层。该层提供的服务由硬件和软件共同实现。IEEE 802.15.4 定义了 2.4GHz 和 868/915MHz 两个信道，两者均基于直序扩频（Direct Sequence Spread Spectrum，DSSS）技术。868 MHz 只有一个信道，传输速率为 20kbps；902～928MHz 频段有 10 个信道，信道间隔为 2MHz，传输速率为 40kbps。2.4～2.4835GHz 频段有 16 个信道，信道间隔为 5MHz，提供 250kbps 传输速率，采用 O-QPSK 调制。

本层提供物理层数据实体（PLDE）和物理层管理实体（PLME）。通过该接口能唤醒层管理服务功能，同时维护与物理层相关的管理对象的数据库（PIB）。

物理层主要完成如下任务：

① 无线收发机的激活与关闭。

② 当前信道的能量检测（Energy Detect，ED）。

③ 接收数据包的链路质量标识（LQI）。

④ 为载波侦听多路访问/冲突防止提供空闲信道评估（CCA）。

⑤ 选择工作信道。

⑥ 发送和接收数据。

（2）MAC 层。MAC 层即媒体接入层，包括 MAC 层管理实体（MLME）和 MAC 层数据实体（MLDE）。MLME 提供可以唤醒 MAC 层管理服务的接口，同时维护一个与 MAC 层相关的管理对象数据库（MIB）。

MAC 层功能包括设备间无线链路的建立和拆除、确认帧传送与接收、信道接入控制、帧校验、预留时隙管理和广播信息管理，具体如下。

① 当 ZigBee 节点为网络协调器时，产生信标（Beacon）帧。

② 在信标帧之间进行同步。

③ 支持网络协调点的关联与解关联。

④ 支持节点安全机制。

⑤ 对信道接入使用 CSMA-CA 机制，以检测和避免数据传输冲突。

⑥ 处理和维护有保证的时隙（GTS），即在保证时隙内发送数据，其他时隙休眠的机制。

⑦ 在两个对等的 MAC 实体间提供可靠连接。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

MAC 层和物理层协议是网状网络的应用基础，高容错和低功耗的特点能保证网状网络的基于拓扑控制和功率控制的网络自组织特性。

（3）链路层。本层包括 IEEE 802.15.4 的逻辑链路控制层（Logic Link Control，LLC）和业务相关的汇聚子层承载的 IEEE 802.2 的 LLC 标准。本层的主要功能包括：

① 传输可靠性保障和控制；

② 数据包的分段与重组；

③ 数据包的顺序传输。

（4）网络层。主要实现组建网络，为新加入者分配地址、路由发现、路由维护等，提供一些必要的函数，确保 MAC 层正常工作，并为应用层提供合适的服务接口，从而使网状（Mesh）网络的应用能够实现。

网络层管理实体提供如下服务。

① 配置一个新设备：保证设备有足够的堆栈，以满足配置之需。配置包括对 ZigBee 协调器和连接现有网络设备的初始化操作。

② 加入或离开网络：具有连接或者断开网络的能力，以及建立一个 ZigBee 协调器或路由器，具有要求设备与网络断开的能力。

③ 寻址：ZigBee 协调器和路由器具有为新加入网络的设备分配地址的能力。

④ 邻居发现：具有发现、记录和汇报相关的邻居设备信息的能力。

⑤ 接收控制：具有控制设备接收机接收状态的能力，即控制接收机什么时间接收、接收时间长短，以保证 MAC 层的同步或者正常接收等。

（5）应用层。应用层由 3 部分组成：应用支持（Application Support，APS）子层、ZigBee 设备对象（ZigBee Device Object，ZDO）和应用对象。本层主要规定了一些应用相关的功能，包括端点（Endpoint）、绑定（Binding）、服务发现和设备发现等。

应用支持子层是网络层和应用层的接口，可调用一系列被 ZDO 和用户自定义应用对象的服务。APS 子层的任务包括维护绑定表和绑定设备间消息传输。所谓绑定，指根据两个设备提供的服务和它们的需求将两个设备关联起来。

ZigBee 设备对象是一种通过调用网络和应用支持子层原语来实现 ZigBee 规范中规定的 ZigBee 终端设备、ZigBee 路由器以及 ZigBee 协调器的应用。ZDO 的主要功能如下。

① 对 APS 子层、网络层、安全服务模块（SSP）以及相关设备层的初始化。

② 集成终端应用的配置信息，实现设备服务发现、网络管理、网络安全、绑定和节点管理等功能。

应用对象规定了设备绑定、设备发现和服务发现在 ZDO 中的实现方式，包括设备和服务发现、终端设备绑定请求过程、绑定和解除绑定过程、网络管理。

6. ZigBee 网络拓扑结构

ZigBee 网络支持两种物理设备；全功能设备（Full Function Device，FFD）和精简功能设备（Reduced Function Device，RFD）。FFD 提供全部 MAC 服务，能充当任何 ZigBee 节点，发送和接收数据，具备路由功能，可充当网络协调器接收子节点数据。RFD 只能充当终端节点，不能充当协调器和路由节点，只将采集的数据发送给协调器和路由节点，RFD 间的通信必须通过 FFD 才能完成。同时，RFD 仅使用较小的存储空间，很容易组建低成本和低功耗的

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

无线通信网络。

ZigBee 标准定义了 3 种节点：ZigBee 协调点（Coordinator）、路由节点（Router）和终端节点（End Device），也定义了三种网络拓扑形式：星状、树状和网状，如图 4-10 所示。

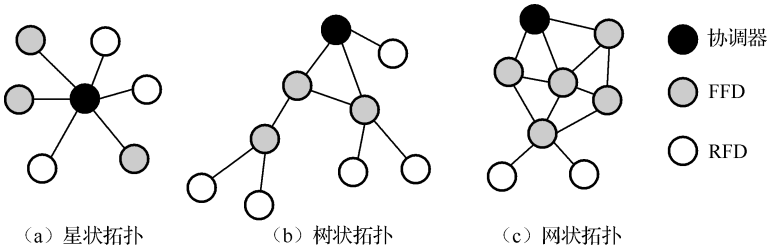


图 4-10　ZigBee 网络的三种网络拓扑形式

（1）星状网络。星状网络最简单，由协调器和一系列的 FFD/RFD 构成，节点间的数据传输都要通过协调器转发。节点间的数据路由只有唯一路径，没有可选路径，假如链路中断，则节点间的通信也将中断，故协调器可能成为全网瓶颈。

（2）树状网络。树状网络中，FFD 可包含子节点，而 RFD 只能作为 FFD 的子节点。每个节点都只能和父、子节点通信，即当从一个节点向另一节点发送数据时，信息将向上传递到最近的协调器节点，再向下传递到目标节点。这种拓扑结构的缺点就是信息只有唯一的路由通道，信息路由完全由网络层处理，对应用层是全透明的。

（3）网状（Mesh）网络。网状网络除允许父子节点间的通信外，也允许通信范围内具有路由能力的非父子关系的相邻节点通信。与树状网络不同，网状网络是一种特殊的、按接力方式传输的点对点的网络结构，路由可自动建立与维护，并具有强大的自组织、自愈功能。网络可通过“多级跳”方式通信，可以组成复杂网络，具有很大的路由深度和节点规模。该拓扑结构的优点是减少了消息延时，增强了网络可靠性，缺点是需要更大的存储空间。

7．ZigBee 组网技术

只有协调点才可建立新网络。当建立新网络时，首先扫描寻找网络中的空闲信道，如找到了合适信道，协调点会为新网络选择一个唯一的 16 位个域网标识符（PAN ID）。选定了 PAN ID，就意味着建立了网络。此后，如果另一个协调点扫描该信道，该协调点就会响应并声明它的存在。PAN ID 也是其网络地址。

网络中的所有节点都有一个 64 位的扩展地址和一个 16 位的网络地址，网络地址在整个网络中是唯一的，也就是 MAC 短地址。当协调点选定网络地址后，就可接收新节点入网。当一个节点要求入网时，它先会扫描信道来搜索周围的网络，当找到网络时，会关联加入，但只有具备路由功能的节点才允许别的节点通过它入网。如网中的节点与网络失去联系后要求重新加入，可按孤立节点申请重新入网。网中每个具备路由功能的节点都维护一个路由表和一个路由发现表。

8．ZigBee 传输数据

ZigBee 网络中传输的数据可分为 3 类：

（1）周期性数据，如传感器网络传输的数据，此类数据的传输速率由不同的应用确定。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

（2）间歇性数据，如电灯开关数据，此类数据的传输速率由应用或外部激励确定。

（3）反复性的、反应时间短的数据，例如无线鼠标传输的数据，此类数据的传输速率是根据时隙分配而确定的。

9. ZigBee 的技术优势

ZigBee 网络具有以下几个优点。

（1）低功耗。ZigBee 的传输速率低，传输数据量小，且采用休眠模式，故设备省电。据估算，ZigBee 设备仅靠两节 5 号电池就可以维持 6 个月到 2 年的使用时间。同样条件，蓝牙能工作数周，Wi-Fi 仅能工作数小时。

（2）低成本。由于采用大幅简化的协议（不到蓝牙的 1/10），降低了对通信控制器的要求。ZigBee 模块的价格在国内目前已降至 10 元人民币左右，国外降至 1.5 美元，且 ZigBee 协议免专利费，目标价格是降至几美分。

（3）时延短。ZigBee 的响应速度快，从休眠转入工作状态只需要 15ms，搜索设备时延约 30ms，活动设备信道接入时延为 15ms。相比而言，蓝牙需要 3～10s，Wi-Fi 需要 3s。

（4）网络容量大。可采用星状、树状和网状结构，一个主节点管理若干子节点，最多可达 254 个子节点；主节点还可由上一层网络节点管理，可组成最多达 65000 个节点的网络。

（5）可靠性高。为避开发送数据冲突，采取碰撞避免策略，并为需要固定带宽的业务预留了专用时隙。MAC 层采用完全确认的数据传输模式，每个发送的数据包都须等待接收方的确认，如果传输中出现问题则须重发。

（6）安全性好。ZigBee 提供了基于循环冗余校验（CRC）的数据包完整性检查功能，支持鉴权和认证，采用特定加密算法来保护数据并防止攻击者冒充合法设备。

10. ZigBee 适用的技术特性

ZigBee 技术主要用于短距离无线网络通信。如符合以下条件，就可考虑采用。

（1）需要数据采集或监控的网点较多。

（2）传输数据量不大，而要求节点成本低。

（3）要求数据传输的可靠性与安全性较高。

（4）节点体积小，不便于放置较大的电池或者电源模块。

（5）地形复杂，监测点多，需要较大的网络覆盖。

（6）现有移动网络存在覆盖盲区。

（7）使用现有移动网络进行低数据量传输的遥测遥控系统。

（8）使用 GPS 效果差或成本太高的局部区域移动目标的定位应用。

11. ZigBee 的应用前景

ZigBee 的应用主要如下。

（1）智能家居和楼宇自动化。通过 ZigBee 网络，可远程控制家中电器、门窗，以及完成水、电、气的远程自动抄表等；也可通过 ZigBee 遥控器控制各家电节点，如电灯开关、烟火检测器、抄表系统、无线报警、安保系统、HVAC、厨房机械等。

（2）消费和家用自动化。可通过 ZigBee 联网的家用设备有电视、录像机、无线耳机、PC

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

外设、运动与休闲器械、儿童玩具、游戏机、窗户和窗帘及其他家用电器等。

（3）工业自动化领域。工业自动化利用传感器和 ZigBee 网络，使数据的自动采集、分析和处理更容易，可作为自控辅助系统，如危险化学成分检测、火警检测和预报、高速机器的检测和维护等。

（4）医疗监控。借助各种传感器和 ZigBee 网络，准确实时地监测病人的血压、体温和心率等，减少医生查房的工作负担，有助于及时反应，特别是对危重病者的动态监护。

（5）农业领域。传统农业使用孤立、无通信能力的机械设备，依靠人力监测作物的生长状况。采用 ZigBee 传感器网络，农业可转向以信息和软件为中心的生产模式，使用更多的自动化、网络化、智能化的远程控制设备来耕种。传感器可收集土壤湿度、氮浓度、pH 值、降水量、温湿度和气压等信息，这些信息和相应的位置通过网络传输到中央控制设备，供农民参考，这样就能及早且准确地发现问题，提高农作物产量。

4.5 Wi-Fi 技术

1. 概述

Wi-Fi（Wireless Fidelity）原意为无线保真，是一种可将 PC、手持设备、打印机、扫描仪等以无线方式互相连接入网的技术。Wi-Fi 也是一个无线通信技术的品牌，由 Wi-Fi 联盟（Wi-Fi Alliance）持有，目的是改善 IEEE 802.11 标准的无线网络产品间的互通性。

Wi-Fi 是目前使用最广泛的一种无线网络传输技术。它将有线网络信号转换成无线信号，如使用一个无线路由器，就可将有线信号转换为 Wi-Fi 信号，在其电波覆盖范围内都可入网；如无线路由器连接了一条 ADSL 线路或者其他网线，又被称为热点。

Wi-Fi 是一种短程无线传输技术，传输速率可达 54Mbps，符合个人和社会信息化之需。Wi-Fi 无须布线，适合移动办公和家庭用户等的需要，且发射信号功率低于 100mW，小于手机发射功率。在信号弱或有干扰的情况下，带宽可自动调整为 5.5Mbps、2.4Mbps 和 1Mbps，以保障网络稳定性和可靠性。在开放区域，通信距离可达 300m；在封闭区域，通信距离为 76～122m，方便与现有的有线以太网整合，组网的成本更低。

2011 年，全球已有约 7 亿 Wi-Fi 用户，2012 年售出的 Wi-Fi 手机有 5 亿余部，2014 年 90% 的智能手机都拥有 Wi-Fi 接口。预计 2020 年，全球公共 Wi-Fi 热点数将达到 4.32 亿个。

2. Wi-Fi 接入

Wi-Fi 热点通过在互联网连接访问点来创建，访问点将无线信号通过短程传输（一般覆盖 100 m）。当一台支持 Wi-Fi 的设备遇到一个热点时，就可通过无线路由器入网。大部分热点都位于供大众访问的场所，例如机场、咖啡店、旅馆、书店及校园等，许多家庭和办公室也拥有 Wi-Fi 网络。图 4-11 为 Wi-Fi 卡、无线路由器和 Wi-Fi 标志。

无线路由器结合了数字用户线调制解调器、电缆调制解调器和 Wi-Fi 接入点，提供互联网接入。无线路由器使用 IEEE 802.11b 或 IEEE 802.11g 标准与内置天线，在无障碍物下的覆盖范围为：室内 50m^2，室外 140m^2。该范围会随频率波段的改变而改变。Wi-Fi 在 2.4GHz 频段的传输速率可达 54Mbps（IEEE 802.11n 工作在 2.4GHz 或 5.0GHz，最高速率达

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

600Mbps）。Wi-Fi 的频率由于电波传播的复杂性，特别是树和建筑物影响信号，并不适用于远距离传输。

全球 Wi-Fi 运作的频谱和配置并不一致。美国标准在 2.4GHz 频段有 11 个通道；欧洲大部分地区还有另外两个通道，共 13 个通道；日本再多一个通道。

图 4-11　Wi-Fi 卡、无线路由器和 Wi-Fi 标志

3. Wi-Fi 技术架构

（1）Wi-Fi 连接点的网络组成和结构。

① 站点（Station）：网络最基本的组成部分。

② 基本服务单元（Basic Service Set，BSS）：网络基本的服务单元。最简单的服务单元可以只由两个站点组成，站点可以动态连接到基本服务单元中。

③ 分配系统（Distribution System，DS）：连接不同的基本服务单元。分配系统使用的媒介逻辑上和基本服务单元使用的媒介截然分开，尽管它们物理上可能是同一媒介，例如同一个无线频段。

④ 接入点（Acess Point，AP）：既有普通站点的身份，又有接入分配系统的功能。

⑤ 扩展服务单元（Extended Service Set，ESS）：由分配系统和基本服务单元组合而成。该组合是逻辑的而非物理的，不同的基本服务单元可能地理位置相去甚远。分配系统也可以使用各种各样的技术。

⑥ 关口（Portal）：逻辑成分，用于将无线局域网和有线局域网或其他网络联系起来。

（2）三种媒介包括站点使用的无线的媒介、分配系统使用的媒介以及和无线局域网集成在一起的其他局域网使用的媒介。物理上它们可能互相重叠。

（3）IEEE 802.11 定义了分配系统应该提供的服务。整个无线局域网定义了 9 种服务，5 种服务属于分配系统的任务，分别为连接（Association）、结束连接（Diassociation）、分配（Distribution）、集成（Integration）、再连接（Reassociation）；4 种服务属于站点的任务，分别为鉴权（Authentication）、结束鉴权（Deauthentication）、隐私（Privacy）、MAC 数据传输（MS-DU delivery）。

4. Wi-Fi 的优势与发展趋势

1）Wi-Fi 的优势

① 覆盖范围广：基于蓝牙技术的电波覆盖范围小，半径仅 15m，而 Wi-Fi 的半径可达约 100m。采用最新技术的交换机，能将 Wi-Fi 无线网络的通信距离扩大到约 6.5km。

② 传输速率高：虽然 Wi-Fi 技术的通信质量不是很好，数据安全性能比蓝牙差一些，传

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

输质量也有待改进，但其传输速率高，能达 54Mbps；而 5G Wi-Fi 的传输速率可达 1Gbps，即每秒可传输约 125MB。

③ 进入门槛较低：只要在使用场所设置热点，接入互联网即可。热点可覆盖接入点半径近百米之处，用户只要将支持无线 LAN 的设备拿到该区域内，即可接入互联网。

2）Wi-Fi 的发展趋势

Wi-Fi 是目前无线接入的主流标准，缺点也在改进中。在 Intel 等的支持下，Wi-Fi 正朝着与之兼容的 WiMAX 发展。WiMAX 具有更远的传输距离、更宽的频段选择以及更高的接入速度等，预计其会在未来几年间成为无线网络的一个主流标准。

3）Wi-Fi 的普及

目前在国内外，大量的酒店、商场、机场、车站等公共场所都安装了 Wi-Fi 热点。据预测，到 2020 年，全球 Wi-Fi 热点将增至 1500 万个，主要推动因素是智能手机用户连接 Wi-Fi 的数据在急剧增加。

5. Wi-Fi 与 RFID 系统的结合

Wi-Fi 的普及，使其在物联网中获得了广泛应用。图 4-12 为 Wi-Fi 在 RFID 系统中的应用架构。图中表示装有 Wi-Fi 模块的 RFID 读写器，与拥有 Wi-Fi 终端的 RFID 标签构成一个自动识别系统，在定位系统的支持下，可实现许多场合下的物联网应用。

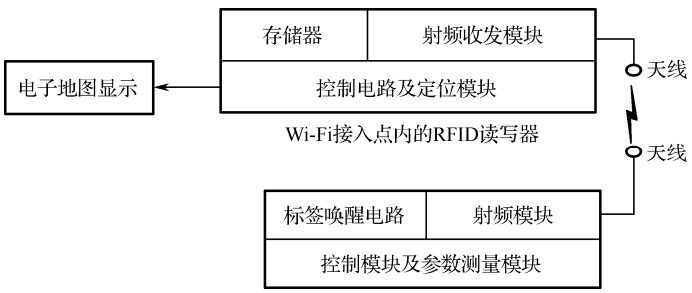


图 4-12　Wi-Fi 在 RFID 系统中的应用架构

4.6　NFC 技术

1. 概述

近距离或近场无线通信（Near Field Communication，NFC）技术是由飞利浦和索尼共同开发的一种非接触式识别和互联技术，可在移动设备、消费类电子产品、PC 和智能控件工具间进行近域无线通信，开展近场信息交换、内容访问与操控服务。

近距离无线通信是一种短距高频无线通信技术，允许电子设备间进行非接触式点对点（10cm 范围内）数据交换。该技术由非接触式射频识别技术演变而来，向下兼容 RFID。它将非接触式读卡器、智能卡和点对点（Peer to Peer）功能整合进一块芯片，提供应用开放接口，主要用于大量手持设备以及 M2M（Machine to Machine，设备对设备）的数据传输。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

图 4-13　装有 NFC 模块卡的手机

图 4-13 为装有 NFC 模块卡的手机。由于现代社会手机普及率极高，故手机与 NFC 的结合，可产生许多与公众、生产和社会关系密切的应用，如身份识别、企业出勤打卡、公交与地铁通勤刷卡、小额支付、物流管理、电子名片等。

2. 技术特点

NFC 技术由 RFID 技术演化而来，也是通过电磁感应耦合方式传输数据，但两者间仍存在较大区别。首先，NFC 的传输距离比 RFID 小，NFC 采取了独特的信号衰减技术，具有距离近、带宽高、能耗低等特点。其次，NFC 与非接触式智能卡技术兼容，是一种近距离的私密通信方式。NFC 标签可保存较多信息，如简短文字、Web 地址、电子名片等；而 RFID 标签的容量小，主要用于记录 EPC 代码或相关指针。

与 RFID 不同，NFC 采用双向识别和连接，在 10cm 距离内工作于 13.56MHz 频率。NFC 比红外传输距离更短、更可靠且简单；与蓝牙相比，NFC 更适于交换个人信息与敏感数据，且可与蓝牙互为补充。NFC 最初仅是遥控识别和网络技术的合并，现已发展成无线连接技术。它能快速自动地建立无线网络，为蜂窝设备、蓝牙设备和 Wi-Fi 设备提供“虚拟连接”，实现电子设备间短距离通信。NFC 的短距离交互简化了认证识别过程，使电子设备间的互相访问更直接、更安全和更清楚，不易受干扰。

NFC 通过在单一设备上组合身份识别应用和服务，在保证数据安全的前提下，可实现数码相机、PDA、机顶盒、计算机、手机等之间的无线互联、数据交换。NFC 手机内置 NFC 芯片，组成无线通信模块，可当电子标签使用——用来支付费用；也可当 RFID 读写器——用于数据读写与交换。NFC 支持多种应用，包括移动支付、对等式通信及移动信息访问等。

3. NFC 技术原理

（1）NFC 设备的运行模式。NFC 设备可采用主动模式或被动模式工作。在被动模式下，NFC 发起设备（主设备）在通信过程中提供射频场（RF-field）。它选择 106kbps、212kbps 和 424kbps 中的一种速率，将数据发送到另一台设备。NFC 目标设备或从设备不产生射频场，而使用负载调制（Load Modulation）技术将数据传回发起设备，其通信机制与基于 ISO 14443A、Mifare 和 FeliCa 的非接触式智能卡兼容。

（2）NFC 设备的基本架构。NFC 是一种无源产品，其标签本身没有电源。为让 NFC 标签工作，通常由有源设备来让 NFC 线圈产生电流，方法是通过手机或其他设备中的线圈电流产生磁场，再感应到 NFC 线圈产生电流。因此，NFC 只能近距离使用，而不能长距离传输。

信号接收装置的工作原理与主动式基本相同，只不过方向相反。接收装置在有效距离内感应到了磁场信号就会产生相应电流并传输到对方设备中。相关电路都调到特定频率，以增加设备在特定频率下的敏感度。而伴随信号的传输将会形成相应的能量转移。

NFC 由几部分组成：NFC 模拟前端（NFC Controller 与天线）、安全控制单元和处理器。根据应用需求，它们可以是 SIM 卡、SD 卡、SAM 卡或其他芯片，NFC 设备的基本架构如图 4-14 所示。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

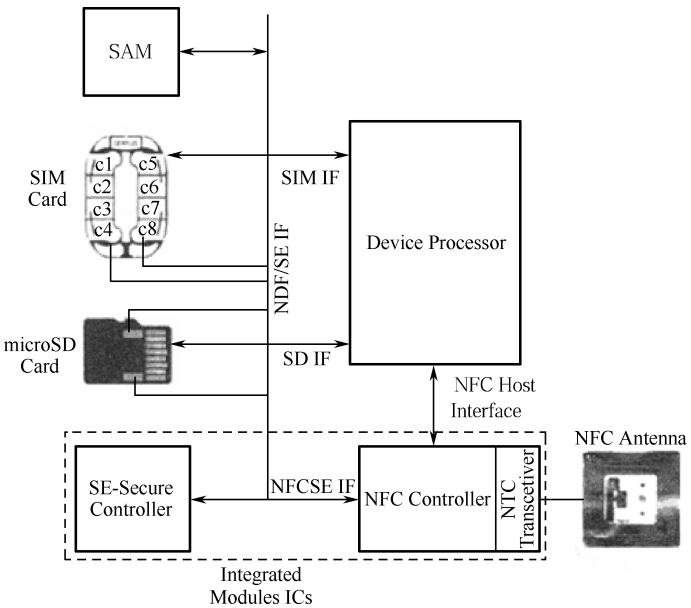


图 4-14　NFC 设备的基本架构

4. NFC 和其他近域通信技术的比较

NFC 优于红外和蓝牙传输方式，作为面向公众的方便小额交易机制，NFC 比红外更快、更可靠且更简单，无须如红外那样必须严格地对齐才能传输数据。与蓝牙相比，NFC 更适于在近域交换财务信息或个人信息等重要数据，但蓝牙能弥补 NFC 通信距离过短的缺陷。

4.7　红外通信技术

1. 概述

自然界一切温度高于绝对零度（−273.16℃）的物体都会不断辐射红外线，该现象称为热辐射。红外线是不可见光波，其光谱分为 4 个波段：近红外（0.76～3μm）、中红外（3～6μm）、中远红外（6～20μm）和远红外（20～1000μm）。红外通信是一种利用红外线进行无线数据通信的技术，目前广泛采用 IrDA（Infrared Data Association，红外数据组织）提出的技术标准。

红外通信距离一般在 0～1m，传输速率可达 16Mbps，通信介质是波长为 900nm 左右的近红外线，是目前被广泛使用的一种无线连接技术。红外通信已被众多的软硬件平台所支持；通过数据脉冲和红外光脉冲间的相互转换实现无线数据收发，用来取代点对点的线缆连接；新通信标准兼容早期的通信标准；小角度（30°锥角以内）、短距离、点对点直线数据传输，保密性强；传输速率较高，目前 4Mbps 速率的 FIR（Fast InfraRed）技术已被广泛使用，16Mbps 速率的 VFIR（Very Fast InfraRed）技术也已经发布。

2. 分类

红外系统按工作原理分为主动式和被动式。主动式系统自带红外光源照射目标，被动式

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

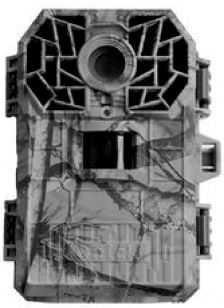
系统则探测目标的红外辐射，可制造热成像系统、搜索跟踪系统、红外辐射计和警报系统等。按信息提供方式，可分为成像和点源系统。按工作方式，还可分为扫描和非扫描系统，扫描系统又分为光机扫描和电子扫描等。

3. 红外通信技术的组成和工作原理

1）工作原理

图 4-15（a）为红外监测仪，为主动式红外系统。图 4-15（b）为野生动物红外监测摄像仪，为被动式红外感测系统，能将感测到的移动生物的红外影像自动摄取下来，并以邮件或多媒体短消息的形式实时对外发送。红外光学系统的结构一般可分为反射式、折射式和折反射式 3 种。红外数据传输系统基本模型如图 4-16 所示。

（a）红外监测仪



（b）野生动物红外监测摄像仪

图 4-15　红外监测仪和野生动物红外监测摄像仪

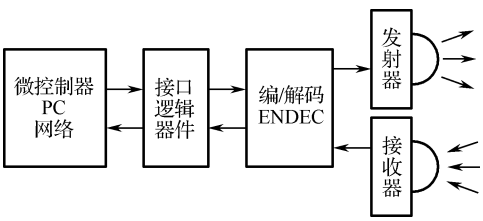


图 4-16　红外数据传输系统基本模型

2）系统组成

系统由红外光学系统、红外探测器、信号放大和处理系统、显示记录系统等组成，功能如下。

① 红外光学系统：将目标的红外辐射集聚到红外探测器上，并以光谱和空间滤波方式抑制背景干扰。

② 红外探测器：一般有光探测器、热释电探测器、热敏探测器、电荷耦合器件和红外电真空器件等。

③ 信号放大和处理系统：置于探测器前的光学调制器，对目标辐射进行调制编码，从背景中提取目标信号或空间位置信息。前置放大器将探测器输出的微弱信号进行初级放大，并提供给探测器。信号处理系统将前置放大器输出的信号进一步放大和处理，提取控制装置或显示记录设备所需的信息。

④ 显示记录系统：信号经放大和处理后，发送给控制和跟踪执行机构或送往显示记录装置。

4. IrDA 红外通信标准

红外通信早期存在多个通信标准，且互不兼容。为此，多家大厂商发起成立了红外数据组织，统一标准，即目前广泛使用的 IrDA 红外数据通信协议及规范。

其主要优点是无须申请频率的使用权，故其通信成本低廉，还有移动通信所需的体积小、功耗低、连接方便、简单易用等特点。此外，红外线发射角度较小，传输安全性高。其不足

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

在于它是一种视距传输，即两个通信设备间不能被其他物体阻隔，因而该技术只用于两台设备间的数据连接。

5. 红外通信技术的应用

目前，红外通信的软硬件技术都很成熟。当今出厂的 PDA、手机、笔记本电脑、打印机等都支持 IrDA 的标准。目前，红外通信技术在智慧城市物联网的许多领域都有广泛应用，如各种水电表、温湿度计、设备自动控制等的有线与无线监测传感器网络。

4.8　UWB

1. 概述

2002 年，美国 FCC 批准将超宽带（Ultra Wideband，UWB）技术转向民用，规定 7.5GHz 为其所用频率，使其发展步伐逐步加快。图 4-17 为 UWB 模块元件与 UWB 定位设备。

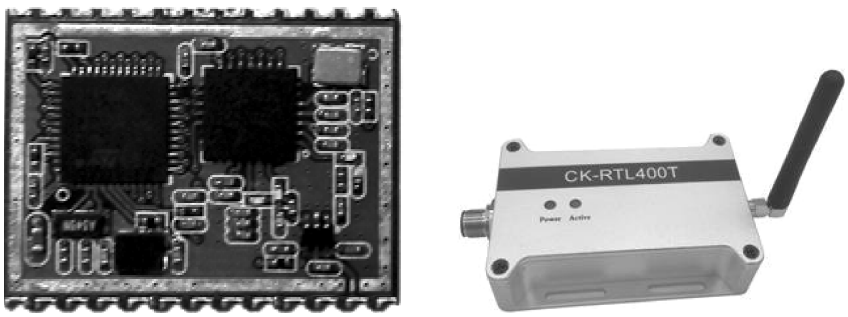


图 4-17　UWB 模块元件与 UWB 定位设备

超宽带不同于传统的窄带和宽带，其频带更宽。窄带是指相对带宽（信号带宽与中心频率之比）小于 1%，相对带宽在 1%～25%的被称为宽带；相对带宽大于 25%，且中心频率大于 500MHz 的称为超宽带。

时域上，传统通信系统通过发送射频载波进行信号调制，而 UWB 是一种无载波通信技术，利用纳秒至微微秒级的非正弦波窄脉冲传输数据。UWB 利用起、落点的时域脉冲（几十纳秒）直接实现调制，超宽带的传输将调制信息过程放在一个极宽的频带上进行，且以该过程持续的时间来决定带宽所占据的频率范围。通过在较宽的频谱上传送极低功率的信号，UWB 能在 10m 左右的范围内实现每秒数兆比特至数千兆比特的数据传输速率。

2. UWB 的技术特点

1）UWB 的优点

与蓝牙和 ZigBee 等带宽相对较窄的通信系统不同，UWB 具有如下优点，因而成为无线局域网和个人局域网等的通信解决方案。

① 抗干扰性能强：UWB 采用跳时扩频信号，系统具有较大的处理增益，在发射时将微弱的无线电脉冲信号分散在宽阔的频带中，输出功率甚至低于普通设备的噪声。接收时将信

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

号能量还原出来，在解扩过程中产生扩频增益。因此，与 IEEE 802.11a、IEEE 802.11b 和蓝牙相比，在同等码速条件下，UWB 具有更强的抗干扰性。

② 传输速率高：UWB 的数据传输速率可达每秒数百亿比特，有望高于蓝牙 100 倍，也高于 IEEE 802.11a 和 IEEE 802.11b。

③ 带宽极大：UWB 带宽在 1GHz 以上，系统容量大，并能和目前的窄带通信系统同时工作而互不干扰。在频率资源日益紧张的今天，UWB 开辟了一种新的时域无线通信资源。

④ 消耗电能小：无线通信系统通信时一般要连续发射载波，要消耗能量。而 UWB 不用载波，只是发出瞬间脉冲电波，即直接按 0、1 发送，并在需要时才发送，故能耗较小。

⑤ 保密性好：UWB 的保密性体现在两个方面，一是采用跳时扩频，接收机只有已知发送端扩频码时才能解出发射数据；二是系统的发射功率谱密度极低，传统接收机无法接收。

⑥ 发送功率极小：UWB 系统发射功率很小，通信设备可用小于 1mW 的功率实现通信。低发射功率延长了电源工作时间，且发射功率小，其电磁辐射对人体影响也较小。

⑦ 穿透力较高：UWB 有高穿透力，其纳秒级的高速脉冲可穿透墙壁和物体，如雷达一样工作。故 UWB 除用于通信外，还用于定位、测距、透视等领域，并将诸功能集于一体。

2）UWB 的局限性

影响 UWB 使用的主要问题就是干扰，具体如下。

① UWB 对其他无线系统的干扰：UWB 用极宽的带宽来收发信号，其中有部分频带与航空、军事、安全、天文等领域的无线通信系统使用的频带重叠，甚至会对 3PS 等其他窄带无线通信造成干扰。

② UWB 受其他无线系统的干扰：如果 UWB 信号低于传统接收机的门限值成立的话，那么传统发射机发射的窄带信号也可能大于 UWB 接收机的门限值，因此在 UWB 接收机的频带内，就极易受到传统窄带通信机的干扰。

③ 由于脉冲持续时间短，要检测接收脉冲就须精确定时。同时，微控制器也会产生噪声。如对传统的收发信号机，只须抑制带外噪声，而对于 UWB 则不可行。

④ UWB 用窄脉冲（高信号/符号率）获取两个可变量：带宽和信噪比（S/N）。而信号在高带宽上会降低平均信噪比，使信号/符号率和信道容量下降。如果 UWB 的目标是得到高信道容量或高数据传输速率，就可通过将平均脉冲频率提高到 2GHz 以上，或提高发送功率的方法来达到此目的，这就与常规无线通信系统一样，即 UWB 系统也要在带宽效率、发送峰值功率、复杂度、灵活支持多速率和用误码率（BER）表示的性能之间取得平衡。

目前，主流的短距离无线通信标准各有千秋，它们之间相互竞争，而在某些领域又相互补充。故单纯地说“UWB 可取代某种技术”并不合适，它们各有最适用的应用领域。

图 4-18 从传输距离与传输速率上对 UWB 与其他无线通信技术进行了比较。

3. UWB 的应用

UWB 主要应用于个人局域网、室内通信、高速无线 LAN、家庭网络、无绳电话、安全检测、位置测定、雷达等领域，其用途主要分为军用和民用两方面。

军用主要有：UWB 雷达、战术手持或 PL I/D 电台、警戒雷达、UAV/UGV 数据链、探测地雷、检测地下埋藏的军事目标或以叶簇伪装的物体等。民用方面主要包括：地质勘探及可穿障传感器成像、汽车防撞系统、家电及便携设备之间的无线通信与测量系统。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

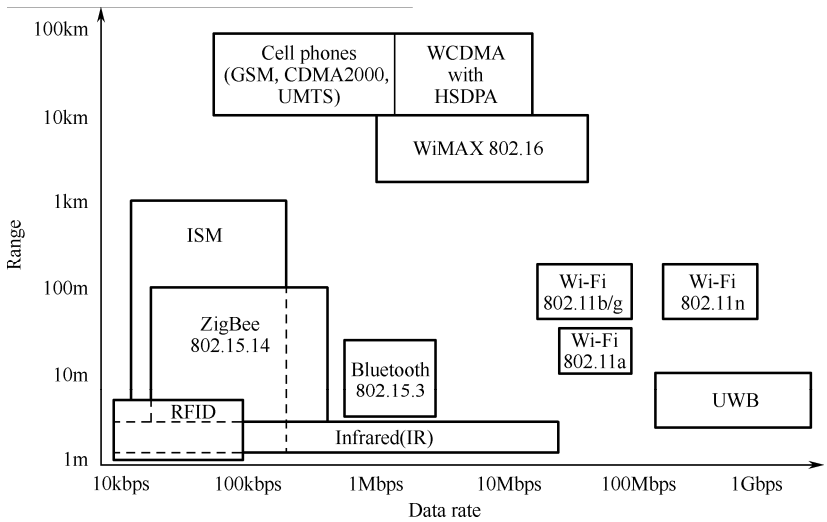


图 4-18　UWB 与其他无线通信技术在传输距离与传输速率上的比较

现以精确定位和家庭数字娱乐中心这两个领域为例进行介绍。

1）精确定位

UWB 的一个重要应用是精确定位，如三维地理定位。该系统由无线 UWB 塔标和无线 UWB 移动漫游器组成，通过漫游器和塔标间的包突发传送完成航程时间测量，再经往返（或循环）时间测量值的对比分析，得到目标的精确定位。系统使用 2.5ns 的 UWB 脉冲信号，峰值功率为 4W，工频范围为 1.3～1.7GHz，相对带宽为 27%，符合 FCC 对 UWB 信号的定义。如果使用小型全向垂直极化天线或小型圆极化天线，其视距通信可超过 2km。在建筑物内部，由于墙壁和障碍物对信号的衰减作用，系统通信距离在 100m 以内。

该技术最初应用在军事上，目的之一是士兵在城市环境下能以 0.3m 的分辨率来测定自身位置。目前主要的商业用途之一是路旁信息服务系统，它能提供高达 100Mbps 的突发信息服务，内容包括路况、建筑物、天气预报和行驶建议，还可用于紧急援助事件通信。

2）家庭数字娱乐中心

家庭数字娱乐中心是指将住宅中的 PC、娱乐设备、智能家电和互联网等连接在一起，人们存储的视频可在 PC、DVD、TV、PDA 等设备上共享观看，可与互联网交换信息，可遥控 PC，让它控制信息家电，使其按设定模式工作；也可通过互联网用无线手柄结合音像设备开展虚拟游戏等。如何把这些相互独立的信息产品连接在一起，是建立家庭数字娱乐中心的关键，而 UWB 的技术特点使其成为一个很好的解决方案。

公众移动通信网络向无线宽带网的演进和物联网应用的普及，加速了蓝牙、Wi-Fi、UWB、RFID 和 ZigBee 等短距离无线技术的互补和融合，越来越多的业务应运而生，相应的硬件与软件也呈现集成化发展趋势。

4.9　定位技术

1. 概述

定位技术属于“基于位置服务”（Location Based Services，LBS）领域，通常由卫星定位

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

技术与地理信息系统（GIS）结合，加上电信运营网络并通过相应核心技术与支撑技术等获得移动终端、用户或实体的实际位置，如其经纬度坐标数据或电子地图上的标示点位，提供给移动用户或他人及通信设备，实现各种与位置相关的服务。该领域中，“位置”这一概念包括：

① 地理位置（空间坐标）；

② 对象处在该位置的时刻（时间坐标）；

③ 处在该位置的对象（身份与标识信息等）。

物联网时代，定位技术除了涉及 GPS 接收装置、手机等移动设备，更有越来越多载有电子标签的人、物与建筑物等成为可定位对象。这将扩大定位技术在人身与财产安全、城市管理、公共服务、安全防恐、医疗护理、物流与供应链管理等领域的应用。

2. 定位方法与系统

定位服务主要涉及以下几种方法。

（1）AOA（Angle of Arrival，到达角度）定位。指通过两个基站的交集来获取移动台（Mobile Station，MS，接收机）的位置。

（2）TDOA（Time Difference of Arrival，到达时差）定位。工作原理类似于 GPS，通过一个移动台和多个基站交互的时间差来定位。

（3）Location Signature（位置标记）定位。对每个位置区进行标识来获取对象位置。

（4）卫星定位。

定位技术涉及核心技术、支撑技术和应用系统三方面。

（1）核心技术。如基于 GPS、AGPS 的定位导航技术，WLAN 的无线通信及定位技术，基于 RFID 等的身份识别与定位导航技术，基于 WSN 的探测、定位及跟踪报警技术，以及位置服务中间件技术（多模式定位导航协同技术、多模式切换与平滑过渡技术）等。

（2）支撑技术。如嵌入式系统技术、数据库管理技术、Ad-Hoc 及 Mesh 网络技术、局域网及互联网技术、MIS 技术等。

（3）应用系统。如目标识别与跟踪导航服务系统、自动电子导航服务系统、智能建筑的应急联动管理系统、关键区域入侵防护与遥测预警系统、复杂建筑的三维地理信息及导航系统等。

4.9.1 全球定位系统

1. 系统构成

全球定位系统（Global Positioning System，GPS）由空间部分、地面控制系统和用户设备（接收机）三部分组成。

（1）空间部分：由 24 颗卫星组成，均匀分布在 6 个轨道面上，轨道倾角为 55°。卫星的分布使得全球任何地方、任何时间都可观测到 4 颗以上的卫星，并能在卫星中预存导航信息。

（2）地面控制系统：由监控站（Monitor Station）、主控站（Master Monitor Station）、注入站组成，如一个主控站、三个注入站、五个监控站。地面控制系统负责收集由卫星传回的信息，并计算卫星星历、相对距离、大气校正等数据。

（3）用户设备：即 GPS 接收机，功能是捕获到按一定卫星截止角所选的待测卫星。当接

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

收机捕获到卫星信号后，就可测出接收机至卫星的伪距离和距离变化率，解调出卫星轨道参数等数据。据此，接收机的微处理器就可按定位解算方法定位，计算出用户所在地理位置的经纬度、高度、速度、时间等信息。GPS 系统结构如图 4-19 所示。

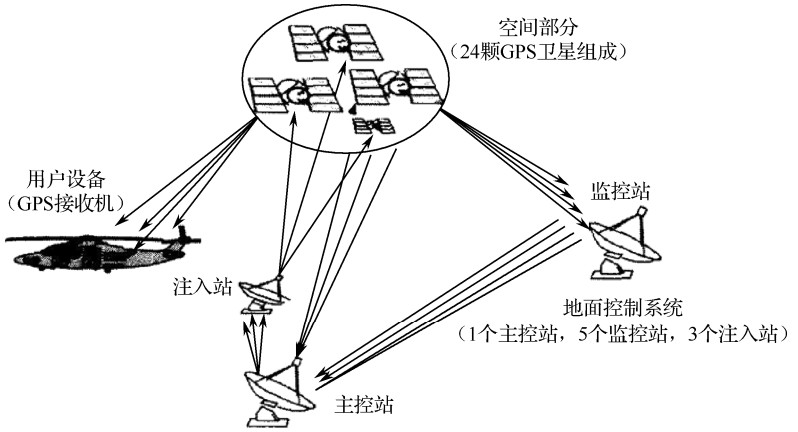


图 4-19　GPS 系统结构

2. 工作过程

GPS 导航系统的基本原理是测量出已知位置的卫星到用户接收机之间的距离，再综合多颗卫星的数据就可知道接收机的具体位置，如图 4-20 所示。

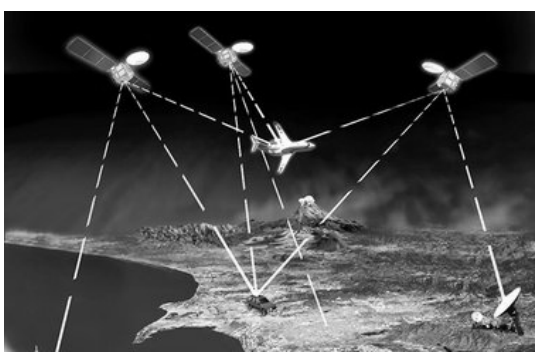


图 4-20　GPS 导航系统工作原理

卫星位置可根据星载时钟记录的时间在卫星星历中查出。接收机到卫星的距离通过记录卫星信号传播到接收机的时间再乘以光速得到。由于大气层电离层的干扰以及接收机与卫星间的时钟误差，该距离并非两者间的真实距离，而是伪距（PR）。

卫星以二进制码元组成的伪随机码（简称伪码）不断地发射导航电文，其中包括卫星星历、工况、时钟改正、电离层时延修正、大气折射修正等信息。接收机收到导航电文，提取卫星时间，用导航电文中的卫星星历数据推算出卫星发射电文时所处位置，并将其与自己的时钟对比，再结合用户在 WGS-84 大地坐标系中的位置、速度等信息便可得知自己的位置。

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

3. 全球四大定位系统

联合国卫星导航委员会认定我国的北斗卫星导航系统、美国的 GPS、俄罗斯的“格洛纳斯”系统和欧盟“伽利略”定位系统为全球卫星导航系统的四大核心服务系统。

1）美国 GPS

1994 年，美国宣布在 10 年内向全世界免费提供 GPS 使用权，但只向外国提供低精度卫星信号。据悉该系统有美国设置的“后门”，一旦需要，美国可以关闭对某地区的信息服务。

2）欧盟“伽利略”定位系统

1999 年，欧洲提出计划，准备发射 30 颗卫星，组成“伽利略”卫星定位系统，2009 年该系统正式启用。

3）俄罗斯“格洛纳斯”系统

该系统始于 20 世纪 70 年代，至少需要 18 颗卫星才能保证覆盖俄罗斯全境；如要提供全球定位服务，“格洛纳斯”系统需要 24 颗卫星。该系统卫星分为“格洛纳斯”和“格洛纳斯-M”两种类型，后者使用寿命更长，可达 7 年。

4）中国北斗卫星导航系统

北斗卫星导航系统是我国自主研发、独立运行的全球卫星导航系统。它由空间段、地面段和用户段 3 部分组成，空间段包括 5 颗静止轨道卫星和 30 余颗非静止轨道卫星，地面段包括主控站、注入站和监控站等若干个地面站，用户段包括北斗用户终端以及与其他卫星导航系统兼容的终端。

① 主控站：用于系统运行管理与控制，主控站从监控站接收数据并进行处理，生成卫星导航电文和差分完好性信息，再交由注入站执行信息的发送。

② 注入站：用于向卫星发送信号，对卫星进行控制管理，在接收主控站的调度后，将卫星导航电文和差分完好性信息向卫星发送。

③ 监控站：用于接收卫星的信号，并发送给主控站，可实现对卫星的监测，以确定卫星轨道，并为时间同步提供观测资料。

④ 用户端，即接收机，也可以是同时兼容其他卫星导航系统的接收机。接收机需要捕获并跟踪卫星的信号，根据数据按一定方式进行定位计算，得到用户的经纬度、高度、速度、时间等信息。

4.9.2 蜂窝基站定位

GSM 蜂窝基站定位具有定位快速、省电、低成本、应用范围限制小的特点，适于在一些精度要求不高的场合应用。

1. GSM 蜂窝基站的基础架构

GSM 网络的基础结构是一系列的蜂窝基站，这些基站把整个通信区域划分成如图 4-21 所示的一个个蜂窝小区。小区半径小则几十米，大则几千米。人们用移动设备在 GSM 网络中通信，实际上就是通过某个基站接入网络，通过 GSM 网络进行数据（语音数据、文本数据、多媒体数据等）传输。GSM 定位就是通过识别这些蜂窝基站（图 4-21）进行对象定位，图 4-21

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

中 MSC 是移动交换中心，通过公共电话交换网（PSTN）与主干网互联。

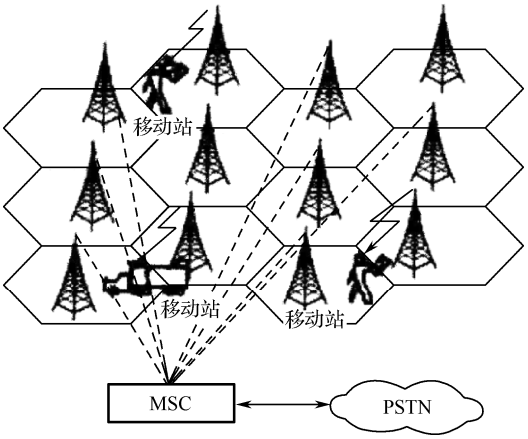


图 4-21　蜂窝基站

2. COO 定位

蜂窝小区（Cell of Origin，COO）定位是 GSM 网获取位置信息来实现位置服务的主要定位技术。COO 定位是一种单基站定位，即根据接收机当前连接的蜂窝基站的位置（在各电信运营商的网络中，每个基站都有唯一的标识号与位置）来确定其位置。显然，定位精度取决于蜂窝小区的半径。基站密集的城市，通常采用多层小区，小区划分得很小，其定位精度可达到 50m 以内。而在其他地区，基站分布分散，小区半径较大，可达几千米，也就意味着这一方法定位精度只能粗略到几千米。

可见，COO 定位精度不太稳定，但它是 GSM 网络中的移动设备最快捷、最方便的定位方法，因为 GSM 网络端以及设备端都不需要任何的额外硬件投入。只要电信运营商支持，GSM 网络中的设备都可以获取当前基站的一个唯一代码，称之为基站 ID 或 Cell ID。

4.9.3　AOA 定位

到达角度（Angle of Arrival，AOA）定位是一种基于方向的两基站定位方法，基于信号的入射角进行定位。

其原理如图 4-22 所示，知道了基站 1 到移动设备间连线与基准方向的夹角α_1，就可画出射线 L_1；同样，知道了基站 2 到移动设备间连线与基准方向的夹角α_2，就可画出射线 L_2，L_1 与 L_2 的交点就是设备的位置。这就是 AOA 定位的基本数学原理。

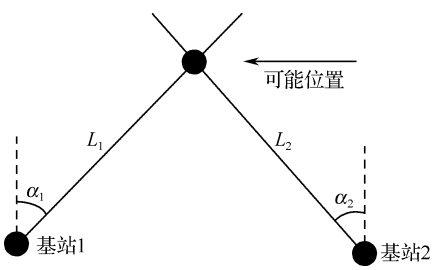


图 4-22　AOA 定位原理

AOA 定位通过两直线相交确定位置，不可能有多个交点，避免了定位的模糊性。为了测量电磁波的入射角，接收机必须配备方向性强的天线阵列。采用此方法在障碍物较少的地区能得到较高的准确度，但在障碍物较多的环境中，由于无线传输存在多径效应，则误差增大。位置测定精度依赖于发送器相对于接

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

收器的位置。如发送器恰好处在两个接收器的连线上，则 AOA 法无法锁定目标位置。此时须采用多个基站来保证定位精度。

混合定位即同时使用两种以上的定位方法，如蜂窝基站定位、七号信令定位、TDOA 或 AOA 定位等。各种定位方法结合使用，取长补短，以达到更高的定位精度。

4.9.4 AGPS 定位

AGPS（Assisted GPS）是一种新型的定位技术，它结合了 GPS 定位和蜂窝基站定位的优势，借助蜂窝网络的数据传输功能，可达到很高的定位精度和很快的定位速度，在移动设备尤其是手机中被越来越广泛地使用。

1. 概述

按定位媒介，定位技术包含基于 GPS 的定位和基于蜂窝基站的定位两类。GPS 定位的弱点：一是硬件初始化（首次搜索卫星）时间较长；二是 GPS 卫星信号穿透力弱，易受建筑物、树木等的阻挡而影响定位精度。AGPS 定位技术通过 GSM 网络等的辅助，成功地解决或缓解了这两个问题。

针对第一个问题，首次搜星慢是因 GPS 卫星接收器需要进行全频段搜索寻找 GPS 卫星所致。在 AGPS 中，通过从蜂窝网络下载当前地区的可用卫星信息（包含当前地区可用的卫星频段、方位、仰角等信息），能避免全频段大范围搜索，使首次搜星速度大为提高。

针对第二个问题，在 AGPS 中，通过蜂窝基站参考 GPS 的辅助，或借助 GSM 定位中 Cell ID 定位（COO 定位）方法，缓解了在 GPS 信号不良的情况下定位的问题，有效提高了在此情况下的定位精度。

2. AGPS 定位流程

AGPS 搜星流程如图 4-23 所示。

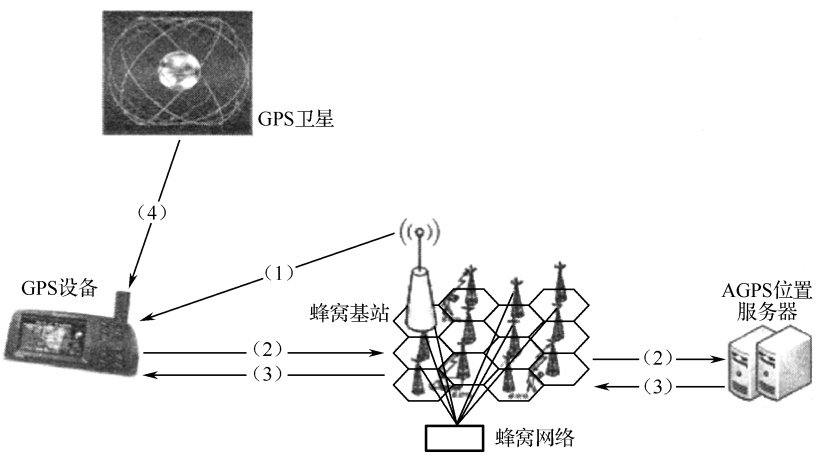


图 4-23 AGPS 搜星流程

（1）移动设备从蜂窝基站获取到当前所在的小区位置（一次 COO 定位）。

（2）移动设备通过蜂窝网络将当前蜂窝小区位置传送给网络中的 AGPS 位置服务器。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

（3）AGPS 位置服务器根据当前小区位置查询该区域当前可用的卫星信息（包括卫星的频段、方位、仰角等相关信息），并返回给设备。

（4）GPS 接收器根据得到的可用卫星信息，可快速找到当前可用的 GPS 卫星。

至此，GPS 接收器已经能正常接收 GPS 信号，GPS 初始化过程结束。AGPS 对定位速度的提高就主要体现在此过程中。

GPS 接收器一旦找到四颗以上的可用卫星，就可以开始接收卫星信号实现定位。接下来，根据位置计算所在端的不同，通常有两种方案：在移动设备端进行计算的 MS-Based 方式和在网络端进行计算的 MS-Assisted 方式。

MS-Based 方式中，后续过程与传统 GPS 定位完全相同：GPS 接收器接收原始 GPS 信号，解调并进行一定处理，根据处理后的信息进行位置计算，得到最终的位置坐标。

MS-Assisted 方式中，解调并处理后，AGPS 定位流程如图 4-24 所示。

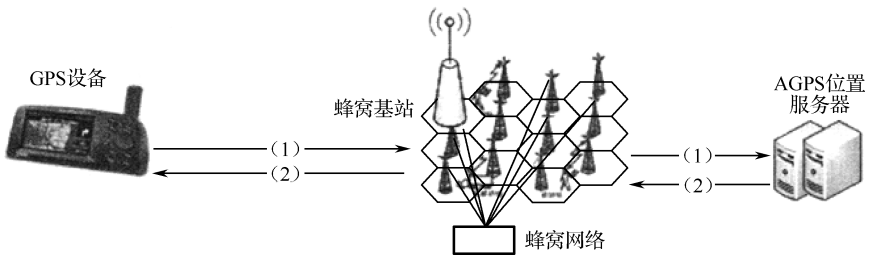


图 4-24　AGPS 定位流程

（1）设备将处理后的 GPS 信息（伪距信息）通过蜂窝网络传输给 AGPS 位置服务器。

（2）AGPS 位置服务器根据伪距信息，并结合其他途径（蜂窝基站定位、参考 GPS 定位等）得到的辅助定位信息，计算出最终的位置坐标，返回给设备。

由于辅助定位信息的加入，能取得更高的定位精度，可在很大程度上克服弱 GPS 信号情况下的无法定位或精度降低的问题；将复杂计算转移到网络端，也可减少设备的耗电。

思考与练习

1．简述无线传感器的概念。

2．IEEE 802.15 工作组有哪几个任务组？

3．简述 ZigBee 的起源、技术优势、协议体系和应用场景。

4．简述 UWB 的技术特点。

5．简述无线定位技术的基本原理。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

第5章

物联网通信技术

【学习要求】

（1）了解无线通信网络覆盖范围与频谱的划分。

（2）掌握移动通信技术（1G、2G、3G、4G、5G）。

（3）了解无线接入技术与光网络技术。

5.1 无线通信网络简述

1. 无线通信网络

迄今为止，没有任何一种单一的无线通信网络能够满足所有的场合和应用，因而技术的多元性是无线网络的一个基本特征。无线网络依据通信覆盖范围的不同，从小到大依次为无线个域网（Wireless Personal Area Network，WPAN）、无线局域网（Wireless Local Area Network，WLAN）、无线城域网（Wireless Metropolitan Area Network，WMAN）和无线广域网（Wireless Wide Area Network，WWAN） 。其中，WPAN 覆盖的范围最小，紫蜂（ZigBee）、蓝牙、超宽带（UWB）和 60GHz 等都属于 WPAN 的范畴；WLAN 覆盖的范围比 WPAN 大，Wi-Fi 属于 WLAN 的范畴；WMAN 覆盖的范围比 WLAN 大，全球微波互联接入（WiMAX）属于 WMAN 的范畴；WWAN 覆盖的范围最大，移动通信 2G、3G、4G 和 5G 都属于其范畴。无线网络覆盖的范围如图 5-1 所示。

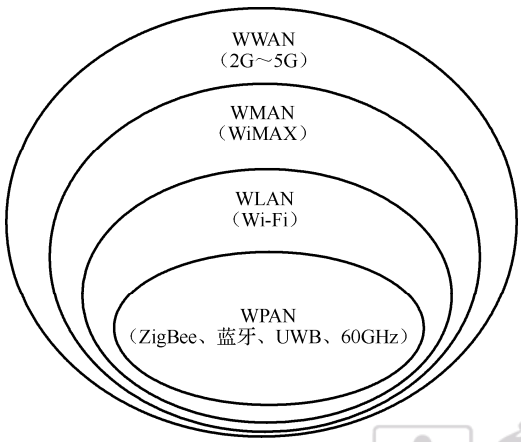


图 5-1　无线网络覆盖的范围

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

1）WPAN

在网络构成上，无线个域网（WPAN）位于整个网络链的末端。WPAN 主要用于实现同一地点终端与终端之间的无线连接，是活动半径较小、业务类型丰富、面向特定群体、无线无缝的无线通信技术。WPAN 覆盖的范围一般在 10m 半径以内，能够有效解决“最后几米电缆”的问题，设备具有价格低、体积小、易操作、功耗低等优点。现在，WPAN 已经成为物联网通信到末梢的一种短距离无线通信方式。

随着 ZigBee、蓝牙、RFID、UWB、60GHz 等各种 WPAN 技术的相继提出，短距离无线通信技术得到了飞速发展。在当今的短距离无线通信领域中，每种 WPAN 技术又各有优势，例如，ZigBee 适合应用在感测和控制场合，蓝牙拥有 QoS（服务质量），UWB 和 60GHz 具备高传输速率，RFID 则在物品识别领域有广阔的天地。各种短距离无线通信满足了随时随地交互信息的愿望，与物联网“通信无处不在”的特点正好契合。因此，WPAN 是物联网通信的“神经末梢”，铺平了物联网的普及之路。目前，多个组织都致力于 WPAN 标准的研究，其中 WPAN 最主要的规范标准集中在 IEEE 802.15 系列。

2）WLAN

无线局域网（WLAN）就是在局部区域内以无线方式进行通信的网络。所谓局部区域，就是距离受限的区域，WLAN 是一种能在几十米到几百米范围内进行通信的无线网络。WLAN 主要在办公区域内、校园内、小范围公共场合或家庭内使用，用于解决用户终端的无线数据接入业务。

IEEE 802.11 是无线局域网的标准。为了促进 IEEE 802.11 的应用，1999 年，工业界成立了 Wi-Fi 联盟，现在 IEEE 802.11 这个标准已统称 Wi-Fi。

3）WMAN

无线城域网（WMAN）的推出是为了满足日益增长的宽带无线接入的需求。虽然多年来 WLAN 的 IEEE 802.11 技术一直被用于宽带无线接入，并获得了很大成功，但是 WLAN 的总体设计及其特点并不能很好地适用于室外，WLAN 在带宽、用户数量和通信距离方面受到了限制。于是，IEEE 制定了一种能解决室外环境和 QoS 两方面问题的 IEEE 802.16 标准，该标准能满足几千米到几十千米的无线接入问题。

IEEE 802.16 是无线城域网的标准之一。为了促进 IEEE 802.16 的应用，2003 年工业界成立了 WiMAX 论坛，现在 IEEE 802.16 标准已统称为 WiMAX。

4）WWAN

无线广域网（WWAN）是采用无线网络把物理距离极为分散的局域网（LAN）连接起来的通信方式。WWAN 连接的地理范围较大，常常是一个国家或一个洲，它的结构分为末端系统（两端的用户集合）和通信系统（中间链路）两部分。

IEEE 也制定了 WWAN 标准（IEEE 802.20）。IEEE 802.20 是 2002 年 3 月提出的，是移动宽带无线接入标准，可解决高速移动环境下的高速率数据传输。移动通信和卫星通信都属于 WWAN 的范畴，并有多个版本的标准。

2. 频谱的划分

1）频谱划分的原则

无线通信需要占用频谱资源。频率的分配主要是根据电磁波传播的特性和各种设备通信

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

业务的要求而确定的。因为电磁波是在全球存在的，所以需要由国际协议来分配频率，目前分配频率的国际组织有国际电信联盟（ITU）、国际无线电咨询委员会（CCIR）、国际频率登记局（IFRB）等。在国际上对频率的划分确定后，各国还可以在此基础上给予具体的分配。我国进行频率分配的组织是工业和信息化部无线电管理局。

2）频谱划分的方式

由于应用领域众多，所以对频谱的划分有多种方式。较为通用的 IEEE 频谱分段法见表 5-1。

表 5-1　较为通用的 IEEE 频谱分段法

频　段	频　率	波　长	备　注
ELF（极低频）	30～300Hz	10000～1000km	
VF（音频）	300～3000Hz	1000～100km	
VLF（甚低频）	3～30kHz	100～10km	
LF（低频）	30～300kHz	10～1km	长波波段
MF（中频）	300～3000kHz	1～0.1km	中波波段
HF（高频）	3～30MHz	100～10m	短波波段
VHF（甚高频）	30～300MHz	10～1m	超短波波段
UHF（超高频）	300～3 000MHz	100～10cm	微波波段
SHF（特高频）	3～30GHz	10～1cm	微波波段
EHF（极高频）	30～300GHz	1～0.1cm	微波波段
亚毫米波	300～3 000GHz	1～0.1mm	微波波段
P 波段	0.23～1GHz	130～30cm	
L 波段	1～2GHz	30～15cm	
S 波段	2～4GHz	15～7.5cm	
C 波段	4～8GHz	7.5～3.75cm	
X 波段	8～12.5GHz	3.75～2.4cm	
Ku 波段	12.5～18GHz	2.4～1.67cm	
K 波段	18～26.5GHz	1.67～1.13cm	
Ka 波段	26.5～40GHz	1.13～0.75cm	

3）ISM 频段

ISM 频段（Industrial Scientific Medical Band）是工业、科学和医用频段，主要开放给工业、科学和医用这三类机构使用。ISM 频段属于无许可（Free License）频段，没有使用授权的限制。ISM 频段允许任何人随意地传输数据，但是对功率进行限制，使得发射方与接收方之间只能有很短的距离，不同使用者之间不会相互干扰。

在物联网中，短距离无线通信不能对其他服务造成干扰，因而通常使用 ISM 频段。ZigBee、蓝牙、RFID、60GHz、Wi-Fi 等就主要使用 ISM 频段。

ISM 频段使用的频率主要为 6.78MHz（6.765～6.795MHz）、13.56MHz（13.553～13.567MHz）、27.125MHz（26.957～27.283MHz）、40.680MHz（40.660～40.700MHz）、433.920MHz（430.050～434.790MHz）、869.0MHz（868～870MHz）、915.0MHz（902～928MHz）、

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2.4GHz（2.400～2.4835GHz）、5.8GHz（5.725～5.875GHz）、24.125GHz（24.00～24.25GHz）、60GHz（我国为 59～64GHz）等。

5.2 移动通信技术

5.2.1 1G 移动通信

第一代移动通信系统采用频分多址（Frequency Division Multiple Access，FDMA）技术，将总带宽分成多个正交频道，每个用户占用一个频道。例如，将分配给无线蜂窝电话通信的频段分为 30 个信道，每个信道都能够传输语音通话、数字服务和数字数据，从而解决了公用移动通信系统所需的大容量要求和频谱资源问题。该系统的主要缺点是频谱利用率低，信令干扰话音业务。

1. 系统结构

每个蜂窝单元有一个基站接收该单元中的电话信息。基站连接到移动电话交换局（Mobile Telephone Switching Office，MTSO）。MTSO 采用分级机制，一级 MTSO 负责与基站间的直接通信；高级 MTSO 负责与低级 MTSO 之间的业务处理。

2. 移交

当电话在蜂窝单元间移动时，基站间会通信，从而交换控制权，避免信道分配出错导致信号冲突。基站对移动电话用户控制权的转换也称“移交”。

5.2.2 2G 移动通信

2G 移动通信技术使用数字制式，支持传统语音通信、文字和多媒体短信，以及一些无线应用协议。其工作模式主要分为以下两种。

1. GSM 移动通信

全球移动通信系统（Global System for Mobile Communication，GSM）是当前应用最广的移动电话标准，为全球 200 多个国家和地区超过 10 亿用户所使用，工作在 900/1800MHz 频段，无线接口采用时分多址（Time Division Multiple Access，TDMA）的数字调制方式，核心网移动性管理协议采用 MAP 协议。

TDMA 把时间分割成周期性的帧（Frame），每帧再分割成若干个时隙向基站发送信号，在满足定时和同步条件下，基站可分别在各时隙中接收各移动终端的信号而不混扰。同时，基站发往多个移动终端的信号都按顺序安排在预定的时隙中传输，各移动终端只要在指定的时隙内接收，就能在合路的信号中把发给它的信号区分并接收下来。TDMA 提高了系统容量，并采用独立信道传送信令，使系统性能大为改善，但系统容量仍然有限，越区切换性能仍不完善。

2. CDMA 移动通信

码分多址（Code Division Multiple Access，CDMA）在蜂窝移动通信网中的应用容量理论

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

上可达到 AMPS 容量的 20 倍。它基于扩频技术，将要传送的具有一定信号带宽的信息数据，用一个带宽远大于信号带宽的高速伪随机码进行调制，使原数据信号的带宽被扩展，再经载波调制发送出去。接收端使用完全相同的伪随机码，对接收的信号进行相关处理，把宽带信号转换成原信息数据的窄带信号（解扩），以实现通信。CDMA 是多路通信方式，即多路信号占用一条信道，不同用户传输信息所用的信号不是靠频率或时隙的不同来区分，而是用各自不同的编码序列来区分，或者靠信号的不同波形来区分。例如，从频域或时域来观察，多个 CDMA 信号互相重叠。信道属于逻辑信道，它们从频域或时域来看都相互重叠。

CDMA 系统中，用户信息传输由基站转发和控制。为实现双工通信，正反向传输各使用一个频率，即频分双工。在正向与反向传输中，除传输业务信息外，还传输相应的控制信息。接收机从多个 CDMA 信号中选出其使用的预定码型的信号，其他不同码型的信号因其与接收机本地产生的码型不同而不能被解调。它们的存在类似于在信道中引入了噪声和干扰，称为多址干扰。

CDMA 的特点：抗干扰性好、抗多径衰落、保密安全性高、容量与质量之间可权衡取舍、同频率可在多个小区内重复使用。

5.2.3 3G 移动通信

第 3 代移动通信技术（3rd-Generation，3G）是指支持高速数据传输的蜂窝移动通信技术，它能同时传送语音和数据信息，速率在 100kbps 以上，可提供移动宽带多媒体业务，包括支持高速移动环境下 144kbps、步行和慢速环境下 384kbps、室内 2Mbps 的传输服务。

国际电信联盟（ITU）在 2000 年确定 W-CDMA、CDMA2000、TD-SCDMA 及 WiMAX 为四大主流无线接口标准，并写入 3G 技术指导性文件《2000 年国际移动通信计划》（简称 IMT—2000）。中国大陆支持国际电信联盟确定的三个 3G 无线接口标准，分别是 CDMA2000、W-CDMA 和 TD-SCDMA，三大标准在技术上各有特点，CDMA 是第三代移动通信系统的技术基础。

（1）W-CDMA。W-CDMA 全称为宽带码分多址（Wideband CDMA），是一种利用码分多址复用的宽带扩频 3G 移动通信标准，采用直序扩频码分多址（DS-CDMA）和频分双工（FDD）模式，支持移动/手持设备间的语音、图像、数据及视频通信，速率可达 2Mbps（室内静止）或 384kbps（户外移动）。输入信号先被数字化，然后在一个较宽的频谱范围内以编码扩频模式传输。窄带 CDMA 使用 200kHz 带宽载频，而 W-CDMA 使用 5MHz 带宽载频。

W-CDMA 源于欧洲的宽带 CDMA 技术，和日本的宽带 CDMA 技术基本相同，与 GSM 网络有良好的兼容性和互操作性。该系统能架设在 GSM 网络上，使系统提供商可较轻易地过渡，而在 GSM 系统相当普及的亚洲对其接受度较高，故其具有先天的市场优势。

（2）CDMA2000。CDMA2000 是由窄带 CDMA 发展而来的 3G 移动通信框架标准，是 ITU 的 IMT—2000 标准认可的无线电接口，也称 CDMA Multi-Carrier，从窄频 CDMA One 标准衍生而来。它由美国高通公司主导提出，摩托罗拉和韩国三星等公司都参与其中，韩国现在成为该标准的主导者。

（3）TD-SCDMA。TD-SCDMA 即时分—同步码分多址（Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access），是我国制定的 3G 标准。该技术为我国自主知识产权。由于中国市场庞大，该标准受各大主要电信设备厂商的重视，全球主要的设备厂商都宣布支持该标准。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

其主要特点如下。

① 在频谱利用率、频率灵活性、业务支持多样性及成本等方面有独特优势。

② 采用时分双工，上行和下行信道特性基本一致，因此，基站根据接收信号估计上行和下行信道特性比较容易。此外，TD-SCDMA 使用智能天线技术有先天的优势，而智能天线技术的使用又引入了 SDMA 的优点，可减少用户间干扰，提高频谱利用率。

③ 同时具有 TDMA 的优点，可灵活设置上行和下行时隙的比例，从而调整上行和下行的数据速率的比例，特别适合互联网中上行数据少而下行数据多的场合。但这种上行/下行转换点的可变性给同频组网增加了一定的复杂性。

④ 由于时分双工，所以不需要成对的频带。因此，和另外两种频分双工的 3G 标准相比，在频率资源的划分上更加灵活。

TD-SCDMA 由于采用智能天线和同步 CDMA 技术，能提高系统容量，CDMA 系统的容量能增加 50%，且降低了基站的发射功率，简化了系统，减少了干扰。TD-SCDMA 的软件无线技术使不同系统间的兼容性也容易实现。

由于我国拥有全球数量最多的移动用户，这为 TD-SCDMA 提供了最大的支持，加之政府引导，使其在我国有更大应用与发展空间。

（4）三种 3G 标准的技术比较。三种 3G 标准的主要技术差别见表 5-2。

表 5-2 三种 3G 标准的主要技术差别

标准	TD-SCDMA	W-CDMA	CDMA2000
信道带宽（MHz）	1.6	5/10/20	1.25/10/20
码片速率（Mbps）	1.28	3.84	3.6864
基站间同步	异步/同步	同步/同步	同步
帧长（ms）	10	10	20
双工技术	TDD	FDD/TDD	FDD
多址方式	TD-SCDMA	DS-CDMA	DS-CDMA 和 MC-CDMA
语音编码	固定速率	固定速率	可变速率

（5）WiMAX。WiMAX 采用 IEEE 802.16 的无线城域网标准，是另一种为企业和家庭用户提供“最后一公里”接入的宽带无线连接方案。2007 年，经国际电信联盟（ITU）批准，WiMAX 成为继 WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA 之后的第 4 个全球 3G 标准。

如图 5-2 所示为 WiMAX 室外天线与 PC 卡。

图 5-2 WiMAX 室外天线与 PC 卡

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

WiMAX 拥有以下优势。

① 远距离传输。WiMAX 能实现 50km 无线信号传输，远超无线局域网范围，覆盖面积是 3G 发射塔的 10 倍，只要少数基站就能全城覆盖，可大大扩展无线网络的应用范围。

② 高速宽带接入。WiMAX 能提供的最高接入速率是 70Mbps，是 3G 宽带速率的 30 倍。

③ 优良的“最后一公里”网络接入。作为一种无线城域网技术，它可将 Wi-Fi 热点连接到互联网，也可作为 DSL 等有线接入方式的无线扩展，实现“最后一公里”的宽带接入。WiMAX 可为 50km 线性区域提供服务，用户无须线缆即可与基站建立宽带连接。

④ 多媒体通信。WiMAX 较之 Wi-Fi 具有更好的可扩展性和安全性，从而能实现电信级的多媒体通信服务。

WiMAX 存在以下劣势。

① WiMAX 技术不支持用户在移动中的无缝切换。其支持速率只有 50km/h，高速移动时，WiMAX 达不到无缝切换的要求，跟 3G 的前 3 个主流标准比，其性能相差较远。

② WiMAX 严格地讲不是一个移动通信系统的标准，而是一项无线城域网技术。

③ WiMAX 要到 IEEE 802.16m 才能成为具有无缝切换功能的移动通信系统。WiMAX 阵营把解决该问题的希望寄托于此标准，而此标准的发展目前还存在不确定因素。

5.2.4 4G 移动通信

2013 年 12 月 4 日，工业和信息化部向中国移动、中国电信和中国联通发放了第四代移动通信（4G）业务牌照（TD-LTE 牌照），标志着中国进入了第四代移动通信时代。

4G 通信技术是继 3G 以后的又一次无线通信技术演进，其开发更具有明确的目标性：提高移动装置无线访问互联网的速度。

1. 4G 通信特征

4G 通信具有以下特征。

① 通信速率更高。4G 通信最主要的特征之一是具有更高的通信速率，可达 10～20Mbps，最高达 100Mbps。

② 网络频谱更宽。要使 4G 通信达到 100Mbps，运营商要对 3G 网络进行大幅改造，使 4G 带宽比 3G 带宽高出许多。每个 4G 信道将占 100MHz 的频谱，相当于 W-CDMA 3G 的 20 倍。

③ 通信更灵活。4G 时代的手机早已超出打电话的范围，语音传输只是其功能之一，智能手机实际已是一个带有通信功能的小型计算机。4G 通信使人们不仅能随时随地通话，更可双向上传下载资料、图片、影像和在线游戏，网上定位系统可提供实时地图服务。

④ 智能性更高。4G 移动通信的智能性更高， 4G 终端设备的设计和操作更具智能性，还可实现许多新功能。

⑤ 兼容性能更平滑。4G 的普及不仅应考虑其功能，还应考虑现有的通信基础条件，以便用户在投资最少的情况下能轻易过渡到 4G。因此，4G 移动通信系统应具备全球漫游、接口开放、与多种网络互联、终端多样化及能过渡升级等特点。

⑥ 提供多种增值服务。4G 不是 3G 系统的简单升级，其核心技术有很大的不同。3G 移动通信系统主要以 CDMA 为核心，4G 移动通信系统则以 OFDM 为核心，利用这种技术可实

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

现如无线区域环路（WLL）、数字声讯广播（DAB）等方面的无线通信增值服务。

⑦ 实现更高质量的多媒体通信。4G 系统提供的无线多媒体通信服务包括语音、数据、影像等大量信息，通过宽带信道传送，亦称多媒体移动通信。

⑧ 频率使用效率更高。4G 是运用路由技术（Routing）的网络架构，由于采用了几项不同的技术，所以无线频率的使用比 2G 和 3G 系统有效得多。因其有效性，所以可支持更多用户使用与以前数量相同的无线频谱做更多的事情，并且速度快，下载速率可达 5～10Mbps。

⑨ 通信费用更加便宜。4G 解决了与 3G 的兼容性，能让用户方便地升级到 4G，且 4G 通信引入了许多先进的通信技术，保证了 4G 通信能提供灵活性高的系统操作方式。通信运营商们将考虑直接在 3G 通信网络的基础设施上，以逐步引入方式，有效降低运营商和用户的费用，4G 的无线即时连接等某些服务费用将比 3G 更便宜。

2. 4G 核心技术

4G 将采用一些不同于 3G 的技术，主要归纳如下。

① 正交频分复用（Orthogonal Freqtlency Division Multiplexing，OFDM）技术。OFDM 是一种无线环境下的高速传输技术，在频域内将给定信道分成许多正交子信道，在每个子信道上使用一个子载波进行调制，各子载波并行传输。OFDM 结合分集、时空编码、干扰和信道间干扰抑制及智能天线技术，能大幅提高系统性能。其中，各载波相互正交，每个载波在一个符号时间内有整数个载波周期，每个载波的频谱零点和相邻载波的零点重叠，这便减小了载波间的干扰。由于载波间有部分重叠，所以比传统的 FDMA 提高了频带利用率。

OFDM 可提供无线数据技术质量更高（速率高、时延小）的服务和更好的性价比，能为 4G 无线网提供更好的方案。

② 软件无线电。软件无线电的基本思想是将尽可能多的无线及个人通信功能通过可编程软件来实现，使其成为一种多工作频段、多工作模式、多信号传输与处理的无线电系统，可以说是一种用软件来实现物理层连接的无线通信方式。

③ 智能天线技术。智能天线具有抑制信号干扰、自动跟踪及数字波束调节等功能，是未来移动通信的关键技术。智能天线应用数字信号处理技术，产生空间定向波束，使天线主波束对准用户信号到达方向，旁瓣或零陷对准干扰信号到达方向，达到充分利用移动用户信号并消除或抑制干扰信号的目的。这种技术既能改善信号质量又能增加传输容量。

④ 多输入多输出（MIMO）技术。MIMO 是利用多发射、多接收天线进行空间分集的技术，它采用分立式多天线，能有效地将通信链路分解成许多并行的子信道，以大幅提高容量。信息论已证明，当不同的接收天线和不同的发射天线之间互不相关时，MIMO 系统能够很好地提高系统的抗衰落和噪声性能，获得大容量。在功率带宽受限的无线信道中，MIMO 是实现高数据传输速率、提高系统容量、提高传输质量的空间分集技术。

⑤ 基于 IP 的核心网。4G 系统的核心网是一个基于全 IP 的网络，能实现不同网络间的无缝互联。核心网独立于各种具体的无线接入方案，能提供端到端的 IP 业务，能与已有的核心网和 PSTN 兼容。核心网具有开放结构，允许各种空中接口接入。核心网能把业务、控制和传输等分开。采用 IP 后，所采用的无线接入协议与核心网络协议、链路层是独立的。IP 与多种无线接入协议兼容，因此在设计核心网络时有很大的灵活性，不用考虑无线接入究竟采用何种方式和协议。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

3. 4G 标准

① 长期演进。LTE（Long Term Evolution，LTE）是 3G 的演进，它改进并增强了 3G 的空中接入技术，采用 OFDM 和 MIMO 为无线网络演进的标准。其主要目标是在 20MHz 频谱带宽下提供下行 100Mbps 与上行 50Mbps 的峰值速率，大幅提高小区容量，并大大降低网络延迟（内部单向传输时延低于 5ms，控制平面从睡眠状态到激活状态迁移时间低于 50ms，从驻留状态到激活状态的迁移时间小于 100ms）。其标准是第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project，3GPP）长期演进（LTE）项目，其演进历程如下。

GSM→GPRS→EDGE→W—CDMA→HSDPA/HSUPA→HSDPA+/HSUPA+→FDD-LTE

由于 W-CDMA 的升级版 HSPA 和 HSPA+均能够演化到 FDD-LTE，所以该 4G 标准获得了最大的支持，成为 4G 的主流标准。

② LTE-Advanced。LTE-Advanced 是 LTE 技术的升级版，它满足 ITU-R 的 IMT-Advanced 技术需求，是 3GPP 形成欧洲 IMT-Advanced 技术的一个重要来源。LTE-Advanced 是一个后向兼容技术，兼容 LTE。

5.2.5 5G 移动通信

5G 不仅具有更高速率、更大带宽和更强能力的空中接口技术，而且是面向用户体验、业务应用和行业应用的智能无线网络，5G 的速率、流量密度、连接密度等关键指标对技术、频率、运营等方面提出巨大挑战。

1. 5G 的研究进程

自 2012 年年初 ITU 通过了 4G 标准之后，通信业界开始研究 5G，各国成立了专门组织推进 5G 研究，争抢新一轮技术和标准的影响力和制高点。例如，欧盟启动了 METIS、5GNOW 等多个 5G 预研项目，并成立了 5GPPP；韩国成立了 5G Forum 等；美国和日本也启动了 5G 研究；我国则成立了 IMT-2020（5G）推进组。

2013 年 2 月，我国发起成立了 IMT-2020（5G）推进组，目标是在“3G 突破、4G 同步”的基础上，实现“5G 引领”全球。IMT-2020（5G）推进组前期完成了 5G 的需求、概念、无线技术和网络技术的分析，且有多项成果输入 ITU。IMT-2020（5G）推进组分析了驱动 5G 发展的移动互联网和移动物联网两类业务需求，提出了包括 6 项性能指标和 3 项效率指标的“5G 需求之花”，定义了广域覆盖、热点覆盖、低功耗大连接物联网、低时延高可靠物联网 4 类 5G 主要应用场景。ITU 将 5G 需求和应用场景主要分为 3 类：增强的移动宽带（eMBB）（将我国提出的广域覆盖、热点覆盖归为此类）；海量连接的机器类通信（mMTC）；超可靠和低时延通信（cMTC）。

2. 5G 的技术特点

1）5G 是万物互联、连接场景的一代

移动通信从 1G 到 4G 主要是以人与人通信为主的，5G 则是跨越到人与物、物与物通信的时代。从业务和应用的角度看，5G 具有大数据、海量连接和场景体验三大特点，可满足未来更广泛的数据和连接业务需要。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2）5G 是电信 IT 化、软件定义的一代

5G 是全新一代的移动通信技术，5G 网络呈现软件化、智能化、平台化趋势，5G 是通信技术（CT）与信息技术（IT）的深度融合，5G 是电信 IT 化的时代。

软件定义的 5G 通过采用软件定义网络（Software Defined Networking，SDN）、网络功能虚拟化（Network Function Virtualization，NFV）及软件定义无线电的无线接入空口，实现 5G 可编程的核心网和无线接口。SDN 和 NFV 将引起 5G 的 IT 化，包括硬件平台通用化、软件实现平台化、核心技术 IP 化。

3）5G 是云化的一代

5G 的云化趋势包括基带处理能力的云化（云架构的 RAN，即 C-RAN）、采用移动边缘内容与计算（Mobile Edge Content and Computing，MECC）、终端云化。C-RAN 将多个基带处理单元（Baseband Unit，BBU）集中起来，通过大规模的基带处理池为成百上千个远端射频单元（Remote Radio Unit，RRU）服务，此时基带处理能力是云化的虚拟资源。MECC 在靠近移动用户的位置上提供 IT 服务环境和云计算能力，使应用、服务和内容部署在分布式移动环境中，针对资源密集的应用（如图像、视频、制图等），将计算和存储卸载到无线接入网，从而降低了通信带宽的开销，并提高了实时性。终端云化使移动终端能力和资源（包括计算、存储、传感等）得到大幅提升，也可以实现本地资源的共享和云化。

4）5G 是蜂窝结构变革的一代

1G 到 4G 都基于传统的蜂窝系统，即形状基本规则（六边形）的蜂窝小区组网。目前，密集高层办公楼宇、住宅和场馆等城市热点区域承载了 70%以上的无线分组数据业务，而热点区域的家庭基站、无线中继站、小区基站、分布式天线等（统称异构基站）大多数呈非规则、无定形部署特性和层叠覆盖，形成了异构分层无线网络。另外，结合虚拟网络运营商（Virtual Network Operator，VNO）需求，产生了虚拟接入网（Virtual RAN，VRAN）与虚拟小区的概念，VRAN 可以在一个物理设备上按需产生多个 RAN。可见，传统单层规则的蜂窝小区概念已不存在，5G 移动通信首次出现了去蜂窝的趋势。

5）5G 是承前启后和探索的一代

移动通信技术更新约 10 年一代。1G 的目的是解决语音通信，但语音质量与安全性都不好；到 2G 时，GSM 和 CDMA 在解决语音通信方面达到极致；1998 年提出的 3G，其最初目标是解决多媒体通信（如视频通信），但 2005 年后出现了移动互联网接入的重大应用需求，不过解决得不好；LTE 对移动互联网接入需求的解决是到位的，但又面临语音通信（VoLTE）问题。目前呈现的是“1G 短、2G 长、3G 短、4G 长”的特征，那 5G 呢？5G 的目标是解决万物互联，但目前还没有得到垂直行业（物联网、工业互联网等）的正面回应。因此，5G 将是有探索价值的一代，是移动通信历史上迈向万物互联的承前启后的一代。

3. 5G 的关键技术

1）无线传输关键技术

我国 IMT-2020（5G）推进组梳理了 5G 无线传输关键技术，主要有大规模多天线、新型多址接入、超密集组网、高频段通信、低时延高可靠物联网、灵活频谱共享、新型编码调制、新型多载波、M2M、D2D（Device to Device）、灵活双工和全双工共 12 项关键技术。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2）网络关键技术

我国 IMT-2020（5G）推进组梳理了 5G 核心网络的系列关键技术，主要有控制转发分离、控制功能重构、新型连接管理和移动性管理、移动边缘内容与计算、按需组网、统一的多无线接入技术融合、无线网状网和动态自组织网络、无线资源调度与共享、用户和业务的感知与处理、定制化部署和服务及网络能力开放等关键技术。

4. 5G 引领的战略目标

突破 5G 核心技术是取得 5G 国际标准制定话语权和引领产业的根本。5G 的竞争不仅是通信基础技术的竞争，而且是核心器件等基础产业的全产业链竞争，以及面向行业应用的新产业生态竞争。因此，在推动 5G 发展的过程中，需要特别提升 3 个能力：系统及标准体系的设计和推动能力；基础产业能力，包括器件、芯片、软件等能力；垂直行业的整合及应用推广能力（如工业互联网、车联网等）。我国应采取“发挥优势、引领标准、政策引导、率先示范、突破瓶颈、带动行业”的整体战略。

5.3 有线接入技术

目前，有线接入技术主要有基于双绞线传输的接入网技术、基于光传输的接入网技术和混合光纤/同轴接入网技术。

5.3.1 基于双绞线传输的接入网

所谓双绞线接入技术，是指无须改动铜缆网络，在现有铜线用户线上提供各种宽带业务的技术。铜线接入技术主要有高速率数字用户线（HDSL）、不对称数字用户线（ADSL）和甚高速率数字用户线（VDSL）技术。

1. HDSL

HDSL 采用多对双绞线并行传输，将 T1 或 E1（1.5Mbps 或 2Mbps）的数据流分在两对或三对双绞线上传输，降低每对线上的传输速率，增加传输距离。HDSL 系统的基本构成如图 5-3 所示。HDSL 采用回波抑制、自适应滤波和高速数字处理技术，通过回声抵消技术实现全双工传输。HDSL 是对称式产品，其上行和下行数据带宽相同。HDSL 使用 0.5mm 的双绞线时，无中继传输距离为 3～4km，可以提供 G703、E1/T1 和 V.35 等标准接口。

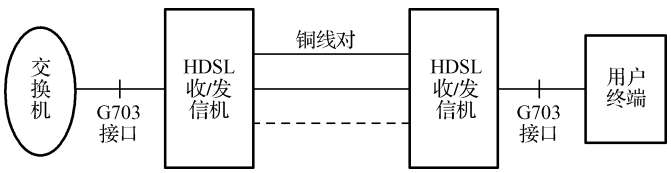


图 5-3　HDSL 系统的基本构成

2. ADSL

ADSL 是一种利用传统的电话线路，高速传输数字信息的技术。ADSL 以普通双绞铜线作

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

为传输介质，可实现下行高达 12Mbps、上行 1Mbps 的传输速率，这样就出现了所谓的不对称传输模式。ADSL 系统的基本构成如图 5-4 所示，只要在普通电话线路两端加装 ADSL 设备，个人用户即可使用高带宽的服务。

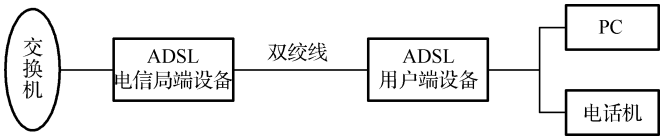


图 5-4　ADSL 系统的基本构成

传统的铜线电话线使用的是 4kHz 以下频段，而 ADSL 将原来电话线路的频段划分成 256 个频宽为 4.3kHz 的子频带，其中 4kHz 以下频段用于电话业务，为标准的电话通道；20～138kHz 频段用来传送上行信号，为 640kbps～1Mbps 的上行通道；138kHz～1.1MHz 频段用来传送下行信号，为 8～12Mbps 的下行通道。ADSL 系统可使用户边打电话边上网，ADSL 电信局端设备与用户终端之间的距离不能超过 5km。

3. VDSL

VDSL 是目前传输带宽最高的一种 XDSL 接入技术。在 VDSL 系统中，无须改动传统的电话线路。VDSL 系统由局端、远端和用户端组成，基本构成如图 5-5 所示。图像信号由局端经光纤送到远端，速率为 622Mbps；远端收/发信机实际上是一个异频双工器，负责将各种信号耦合进双绞线；在用户端，首先利用耦合器将电话信号分离出来，剩下的信号经由收/发信机解调为 25Mbps 和 50Mbps 的基带信号，分送给 PC、TV 等不同的终端，收/发信机同时调制上行 1.5Mbps 数字信号传送给双绞线。

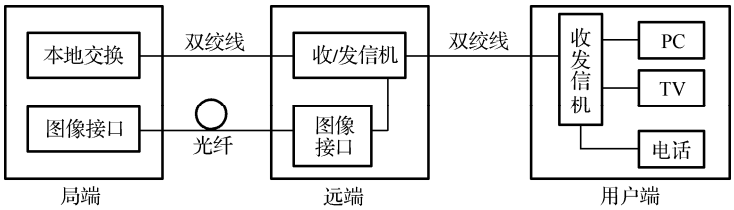


图 5-5　VDSL 系统的基本构成

VDSL 传输速率高，提供上/下行对称和不对称两种传输模式。在不对称模式下，VDSL 最高下行速率能够达到 52Mbps（在 300m 范围内）；在对称模式下，最高速率可以达到 34Mbps（在 300m 范围内）。VDSL 利用高至 12MHz 的信道频带（远远超过了 ADSL 的 1MHz 的信道频带）来换取高的传输速率，由于高频信号在电话线上的大幅衰减，VDSL 的传输距离是非常有限的。

5.3.2　基于光传输的接入网

在用户接入网的建设中，虽然利用原有的电话网可以发挥铜缆的潜力，投资少、见效快，但从发展的趋势来看，光接入方式是宽带接入网的理想解决方案。随着光纤覆盖的不断扩展，光纤技术也在逐渐用于接入网，最终将建成一个数字化、宽带化、智能化、综合化和个人化

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

的用户光接入网络。

1. 光纤接入网特点

光纤接入技术与其他接入技术相比，最大的优势在于可用带宽大。此外，光纤接入网还有传输质量好、传输距离长、抗干扰能力强、网络可靠性高、节约管道资源等特点。光纤接入网为用户提供了可靠性很高的宽带保证，可以实现光纤到路边（FTTC）、光纤到大楼（FTTB）和光纤到家庭（FTTH）。

2. 光纤接入网基本构成

光纤接入网是指用光纤作为主要传输媒质以实现接入网的信息传送功能。光纤接入网包括局端设备（光线路终端）和远端设备（光网络单元），如图 5-6 所示，它通过光线路终端（OLT）与业务节点相连，通过光网络单元（ONU）与用户连接，OLT 与 ONU 则通过传输设备相连。OLT 的作用是为接入网提供与本地交换机之间的接口，它将交换机的交换功能与用户接入完全隔开。ONU 的作用是为接入网提供用户侧的接口，它可以接入多种用户终端，同时具有光电转换功能及相应的维护和监控功能。

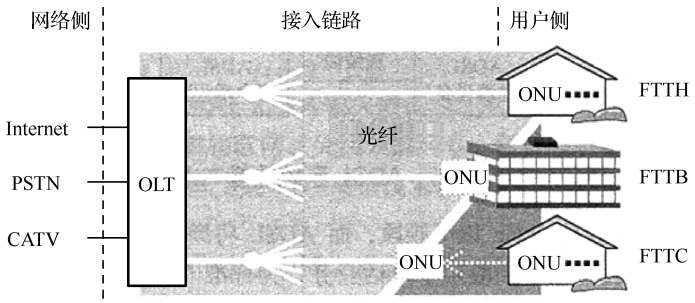


图 5-6　光纤接入网的构成

OLT 和 ONU 在整个接入网中完成从业务节点接口（SNI）到用户网络接口（UNI）间有关信令协议的转换。接入设备还具有组网能力，可以组成多种形式的网络拓扑结构。同时，接入设备还具有本地维护和远程集中监控功能，通过透明的光传输形成一个维护管理网，并通过相应的网管协议纳入网管中心统一管理。

3. 光纤接入网技术

1）有源光网络（AON）

光纤接入网可以是有源光网络（Active Optical Network，AON）。AON 分为基于同步数字系列（SDH）和基于准同步数字系列（PDH），以 SDH 技术为主。AON 的局端设备和远端设备通过有源光传输设备相连，局端设备主要完成接口适配、复用和传输功能，远端设备主要完成业务收集、接口适配、复用和传输功能。接入网的 SDH 传输设备一般提供 155Mbps、622Mbps 或 2.5Gbps 接口，在不加中继设备的情况下传输距离可达 70～80km。

2）无源光网络（PON）

光纤接入网也可以是无源光网络（Passive Optical Network，PON）。PON 并不是所有设备

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

都工作在不需要外接馈电的条件下。在 PON 中，光分路器的工作方式是无源的，光分路器根据光的发送方向，将进来的光信号分路并分配到多条光纤上，或组合到一条光纤上。其余部分还是工作在有源方式下，需要外接电源才能正常工作，主要完成业务收集、接口适配、复用和传输功能。

PON 分为窄带和宽带。ATM 无源光网络（ATM-PON）综合了 ATM 技术和 PON 技术，可以提供从窄带到宽带的各种业务。ATM-PON 采用无源点到多点的网络结构，典型线路速率是下行 622Mbps、上行 155Mbps，由于无源的光分路器会导致光功率损耗，所以 ATM-PON 的传输距离一般不超过 20km。随着 IP 的崛起和发展，又提出了 EPON（Ethernet PON）的概念，用以太网代替 ATM 作为链路层协议，构成一个可以提供更大带宽、更低成本和更强业务能力的 EPON。EPON 的依据是 IEEE 802.3ah 工作组制定的标准，另外 ITU/FSAN 制定了 Gigabit PON（GPON）标准 G984.1 和 G984.2。

3）波分复用（WDM）

光纤接入网还可以是波分复用（Wavelength Division Multiplexing，WDM）的。不同波长的信号只要有一定间隔，就可以在同一根光纤上进行传输而不会发生相互干扰，这就是波分复用的基本原理。我国的宽带接入网已开始采用 WDM 系统，以达到传输速率高、带宽利用率高的效果。

4. 光纤接入网应用前景

光纤到家庭（FTTH）是 30 年来人们不断追求的梦想和探索的技术方向，但由于成本和技术等方面的障碍，直到最近才得到大规模推广。FTTH 是宽带接入的终极技术。由于政策扶持和技术发展，在沉寂多年后，FTTH 再次成为热点，步入快速发展期。

宽带中国战略出台后，对带宽需求的推动是必然趋势。目前运营商采用的主要是 G/EPON，在带宽需求的推动下，10G EPON 将会被应用，届时光纤接入网将进入 10G PON 和 NG PON 时代。专家指出，随着高清晰度电视（HDTV）、IPTV 和电视网络对更高带宽的需求，10G PON 技术日趋成熟，40G/100G 光模块领域已经有了一定的应用，下一代光纤接入网演进和技术正在规划和推进中。

5.3.3 混合光纤/同轴接入网

混合光纤/同轴（HFC）是一种基于频分复用的宽带接入技术，它的主干网使用光纤，采用频分复用方式传输多种信息，分配网则采用树状拓扑和同轴电缆，用于传输和分配用户信息。HFC 是将光纤逐渐推向用户的一种新的演进策略，可实现多媒体通信和交互式视频图像业务。目前，包括 ITU-T 在内的很多国际组织和论坛正在对下一代的 HFC 系统进行标准化，这必将进一步推动其发展。

5.4 光网络

光网络是信息网络基础架构的核心一环，具有不可替代的重要地位。从严格意义上来说，光网络要求数据的传输、交换均在光域上进行，即“全光网络”。而通常所说的“光网络”，一般是指使用光纤作为主要传输介质的广域网、城域网或局域网，而交换、控制可以在电层

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

实现。可以看到，无论是狭义还是广义的光网络，均基于光纤通信。

5.4.1 光纤的发明

1966 年，华裔物理学家高琨（Charles K Kao）博士发表了论文 *Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies*，从理论上证明了用高纯度石英玻璃纤维（光纤）作为传输媒介实现长距离、大容量通信的可能性，并论述了实现低损耗光纤的技术途径，从而奠定了光纤通信的基础，为光通信产业打开了一扇希望之门。

高锟提出，光纤的损耗可低达 20dB/km，可用于通信。当时绝大多数人不相信光纤通信，因为当时世界上最好的光学玻璃是德国的 Ziss 照相机镜头，其损耗是 700dB/km，而常规玻璃的损耗约为数万 dB/km。但美国贝尔（Bell）实验室和康宁（Corning）玻璃公司相信光纤通信。美国康宁公司和贝尔实验室分别于 1970 年和 1974 年研制出损耗为 20dB/km 和 1.1dB/km 的低损耗光纤。高锟因在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”做出突破性成就，获颁 2009 年诺贝尔物理学奖，并被称为“光纤之父”。

光纤的导光原理如图 5-7 所示。光纤是由两层不同折射率的石英玻璃构成的，纤芯的折射率大于包层的折射率，构成了全反射，使光信号可弯曲传输。光纤纤芯必须是“9 个 9”，即 0.999 999 999 的超纯石英，以保证光纤的传输损失极小。改进的化学气相沉积（MCVD）法是制造光纤的一种方法，该方法可制造超纯石英。MCVD 法先将普通石英管通入气体原料，在管外用氢氧焰加温至 1400℃，使之发生化学反应，产生石英粉末，附在石英管壁上。来回移动氢氧焰，附在石英管壁上的石英粉末加厚，直至达到需要的厚度。最后，氢氧焰加温至 2000℃，使管内的石英粉熔成透明的石英，同时包层石英管也因变软而收缩，自动填满中心孔而形成光纤“预制棒”。然后用拉丝机拉丝，拉丝机内有石墨炉，可产生 1400℃高温，使石英棒变软，用电动机旋转滚筒，把光纤“预制棒”拉成直径为 125μm 的光纤。

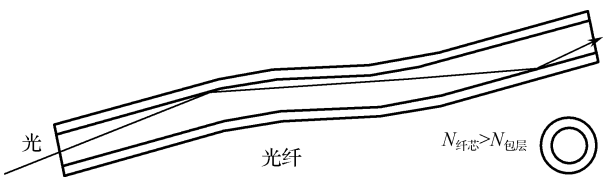


图 5-7 光纤的导光原理

5.4.2 光网络的诞生及发展历程

光的频率和带宽是电的千万倍，意味着光纤将会引起一场通信技术的革命。1976 年，美国亚特兰大开通了世界上第一条光纤通信试验线路，中继距离为 10km，信息速率只有 45Mbps，由于光源是 LED，所以速率不高，信息速率还比不过同轴电缆。1977 年，光纤通信线路首次在美国芝加哥投入商用，用于电话线路，然而此时的光纤通信仅局限于点到点传输，尚未形成网络。现在，光纤通信的单通道速率已超过 1Tbps，单光纤传输容量可达 100Tbps，光网络已经经历了三代的发展历程，链路也由早期的单跨段，发展到今天的多跨段、可自由切换的透明波分网络和弹性波分网络。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

1. 光网络的三代发展历程

1）第一代光网络

1985 年，贝尔通信研究所提出基于光纤通信的同步光纤网（Synchronous Optical Network，SONet）标准。1988 年，国际电报电话咨询委员会（CCITT，ITU 前身）根据 SONet 的概念，开始制定更为通用的同步数字系列（Synchronous Digital Hierarchy，SDH）标准，并于 1992 年形成了第一批建议。SDH 是一种将复接、线路传输及交换功能融为一体并由统一网管系统操作的综合信息传送网络，是同步的光网络。SONet/SDH 集传输、复用和交叉连接于一体，构成了第一代光网络的基础。此后，SDH 产业化快速发展，622Mbps、2.5Gbps 和 10Gbps 的 SDH 系统分别于 1993 年、1995 年和 1996 年进入商用化阶段，光通信开始显露出大容量的优越性。

然而，让光通信产生革命性变化的是波分复用（Wavelength-Division Multiplexing，WDM）技术的出现。WDM 是在同一根光纤中同时传输两个或更多不同波长光信号的技术。WDM 的概念最早在 20 世纪 70 年代被提出，但直到 20 世纪 90 年代，其发展才进入快车道。1992 年，美籍华裔光通信专家厉鼎毅带领他的团队在贝尔实验室开发出世界上第一套 8×2.5Gbps 的 WDM 光通信系统，并首先提出在 WDM 系统中使用光放大器，推动了长距离、大容量光通信的发展。此后，光通信系统的容量不断提升，并解决了网络传输中的带宽瓶颈问题，WDM 光网络也取代了 SDH 光网络并迅速发展壮大。

最初的 WDM 光网络与第一代 SDH 光网络相同，是一种基于点到点传输的光网络，在光网络节点处，数据须进行光-电-光（O-E-O）转换，并在电层进行处理和交换。但是，点到点 WDM 光网络仍然无法克服在节点处的电交换速率瓶颈问题，同时，O-E-O 转换过程对协议格式和通信速率均不透明，使得转换设备非常复杂，因此系统成本大幅增加。随着 WDM 波长数及单波长数据传输速率的提高，该瓶颈表现得愈加突出。

2）第二代光网络

直到全光交换器件出现后，才解决了点到点 WDM 光网络节点处的光电转换瓶颈问题。20 世纪 90 年代中期，出现了以光分插复用器（Optical Add-Drop Multiplexing，OADM）及光交叉连接器为代表的全光交换器件，从而避免了中间交换节点处的 O-E-O 转换，实现了波长粒度的全光透明交换。21 世纪初，在采用这些全光交换器件后，点到点 WDM 光网络演变为波长路由全光网络，第二代光网络由此诞生。波长路由（Wavelength Routing）是指在 WDM 光网络中，节点之间的连接请求是用光波长来建立的，光信号在经过网络节点时，根据它的波长选择路由。

最初的波长路由光网络仅能实现静态配置传输资源的功能。如果要建立一条跨多个路由域的光通路，那么综合网管通常的做法是，根据业务源/目的节点，查询所经的路由域及所经路由域的出/入节点和出/入端口；然后通知每一个子网网管的操作人员，根据当时子网资源查询域内路由资源，完成路由所经节点的开关（端口）配置，并将配置结果和资源变动情况上报综合网管；综合网管在接收到所有经由路由域的成功光通路配置上报信息后，判断整个跨域光通路建立成功。

如果采用这种通过人工配置的建路方法，操作人员建立一条光通路需要几小时甚至几天的时间，无法满足动态业务需求。而且，随着光网络规模的扩大、业务的增多，光网络的管理和维护成本也将逐步提高，业务服务质量和网络生存性难以得到保证。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

3）第三代光网络

为了实现光网络的高度灵活性、扩展性并保证业务的服务质量和网络生存性，一种新型的自动交换光网络（Automatically Switched Optical Network，ASON）体系结构出现了。ASON将光层组网技术和基于 IP 的智能网络控制技术相结合，在传统波长路由光网络传输平面和管理平面的基础上增加了控制平面，并引入路由、信令、链路管理等协议，自动完成数据的交换、传输等功能，从而使光网络由静态的传送网变为可动态重构的智能光网络。这种光网络通常被认为是第三代光网络。

随着光网络规模的不断扩大，对其控制和管理变得异常困难。应对这个问题的主流思想是对网络进行分域管控，将整个光网络基础设施根据地理位置、管理区域、设备类型等因素划分为多个域。这些基础设施可能来自不同的设备制造商，并采用不同的交换技术或控制技术，使得光网络呈现明显的多域异构化趋势。

单域 ASON 体系结构在进行多域异构化扩展的过程中遇到了很大障碍。为了实现跨域光通道的自动建立和拆除，ITU-T 在 G8080 中定义了外部网络接口（ENNI），它规定了 ASON 控制域之间需要交互的信息格式。在此基础上，光互联论坛（OIF）提出了基于 ENNI 的开放式最短路径优先（OSPF）分层路由协议和 ENNI 信令协议，用于异构厂商控制平面的互通。中国电信也依靠自主研发，通过扩展 OpenFlow 协议，基于软件定义网络（Software Defined Network，SDN），成功完成了跨 3 个光传送网（Optical Transport Network，OTN）设备厂商路由域的多域互通测试。

2. 光网络的发展现状

1）骨干网络

骨干网络在以下几方面不断发展：

① 单波速率不断提高（100Gbps、200Gbps、400Gbps、1Tbps），性能进一步提升；

② 高维度大容量光交换及波长选择开关（WSS）的广泛应用；

③ IP 与光的协同；

④ 高密度光芯片集成与硅基光电子的成熟化。

2）城域网络

城域网络在以下几方面不断发展：

① 进一步降低收发器的成本、功耗和体积，比如，将 100Gbps 相干光收发器做成 CFP 级乃至 CFP2 级；

② 结合简单的强度调制/直接检测（IMDD）和光数字处理（ODSP），实现低成本单波 100Gbps 非相干光收发器；

③ 网络的简化和优化；

④ 企业专线的普及应用；

⑤ 移动承载的进一步深入。

3）接入网络

接入网络在以下几方面不断发展：

① 移动前传与回传的低成本解决方案；

② 高容量微波传送方案；

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

③ 高速光纤到户（如 100Gbps PON）及铜线接入的支撑；

④ 现代企业专线；

⑤ 数据中心互联（DCI）。

4）软件定义传送网络

早期的光通信系统结构简单、功能单一，主要依托硬件构建网络运行机制。但经过数十年的发展，结构越来越复杂，不同时期、不同体系、不同功能的设备共存，带来了巨大的管理维护开销，导致其对客户需求响应缓慢，由此诞生了软件管控技术，以提升运维效率。光通信管控技术主要分 3 个发展阶段：自动化控制、开放化协同和物联智慧化。

5.4.3 光纤通信技术的发展现状

在过去的 30 年，光纤通信技术高速发展，主要技术的发展现状如下。

1. 相干检测及光数字处理

在波分系统的 40Gbps 时代，基于直接检测的差分二相位及四相位调制（DPSK/DQPSK）显示出一定的优势。当波分系统进入 100Gbps 时代以后，相干光技术迅速成为了高速光通信系统的主流。目前，400Gbps 已经实现商用，产业逐渐向 Tbps 量级演进，主要技术趋势为光数字处理（ODSP），其将光网络从模拟光时代带入数字光时代。

2. 软件定义收发器及弹性波分网络

ODSP 可以采用灵活可变的 Flex 调制方式，根据不同的传输距离和场景，选择灵活的通道间隔（Flexible-grid）和调制格式（Flexible Format），实现更高效的大容量光传输。目前，16nm 的 ODSP 普遍可以支持 100Gbps QPSK、150Gbps 8QAM、200Gbps 16QAM 和 400Gbps 64QAM。因发送器及接收器均采用 ODSP，收发器可软件定义（Software-Defined Transceiver），由此弹性波分网络（Flexible-grid WDM）得以实现。

3. 电层及光层调度技术

光网络的系统架构越来越复杂，出现了具有多个环网或网状网的拓扑结构，需要多个光纤（多个维度）之间的光交换。得益于大规模集成电路的发展，电层交换技术的发展远远领先于光交换，由此诞生了一种基于电层交换的光网络系统，即 OTN。在 100Gbps 光传送技术开始成熟商用化的今天，业界已全面展开对超过 100Gbps（Beyond 100Gbps）光传送技术的研究。未来的 OTN 需要具备任意业务的承载能力，同时光层的 Flex Grid 技术变革也正驱动着 OTN 向灵活性演进，能够根据传送的业务流量和传送距离灵活选择光调制方式、光频谱资源大小、载波数量等参数，以达到最优化、高效的网络配置。

虽然 OTN 在不断变革，但依旧有技术瓶颈。随着 OTN 交叉容量的增加，其 ODSF 功耗也增加，且只能通过减小芯片纳米工艺数值降低功耗，如 16nm 工艺向 10nm 演进。随着后摩尔时代的到来，集成电路的集成度提升也将达到极限，芯片散热成为最终限制，功耗已经很难继续降低。此外，电交换需要 O/E 及 E/O，带来了相对较高的时延。因此，产业界希望将交换功能从电域转到光域，形成全光交换，并希望将此作为构建全光网的基础。

全光交叉最早的实现路线是延续早期对波长的光上/下路复用（OADM），继续对光波长（光

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

频谱）进行功能增强的波长交换与调度，即可重配 OADM（ROADM）。至 2010 年，波长交换的业界主流商用架构演进成为基于多个 1×*N* 波长选择交换单元（WSS）构成的多维 ROADM（MD-ROADM），每个 WSS 也与本地上/下路的交换单元连接，根据需要任意指配上/下业务的波长，实现业务的灵活调度（可重配）。目前，CDC ROADM 实现商用化指日可待，CDC ROADM 是指波长无关（Colorless）、方向无关（Directionless）、无阻塞（Contentionless）的 ROADM。实现 CDC ROADM 之后，产业界希望全光交叉持续向全光网演进，但由于光缓存及实用化的快速光交换阵列难以实现，使得全光网的核心技术即光突发交换（OBS）和光分组交换（OPS）技术在中短期内难以突破。因此，在全光网到来之前，近年来产业界针对中短期实用化，探索了波长交换粒度的灵活化与精细化，目前波长交换已实现基于 50GHz 波长通道粒度的密集波分复用（DWDM）系统和基于大于 50GHz 波长通道粒度的超通道的灵活粒度光交换。

4. 高速光电器件技术

光器件性能、设计水平和工艺是实现高性能光通信系统的必要保障，也是整个光通信产业链的硬实力和基石。传统的不同功能的光器件必须采用不同的材料来实现。而光子集成技术，尤其是采用大规模半导体制造工艺（如 CMOS）的硅光集成技术，能一举突破器件集成度、功耗、成本等诸多瓶颈，引发了光器件技术的新一轮产业变革。

受到硅在集成电路中广泛运用的启迪，业界从 20 世纪 80 年代开始致力于利用硅材料实现光电子器件，并利用现有的 CMOS 工艺线进行加工。2004 年，美国 Intel 公司和康奈尔大学分别在《自然》杂志上报道了基于马赫-曾德尔干涉仪结构和微环谐振腔结构的 GHz 高速硅光调制器，开启了硅光研究的新纪元。2010 年，IBM 公司发布了 40Gbps 的锗波导型雪崩探测器，工作电压低至 1.5V，对于低功耗的接收端应用意义重大。2015 年年底，IBM 公司联合美国几所高校，利用 45nm CMOS 工艺将 6000 万个晶体管和 850 个光子器件集成在一个芯片上，达到了硅光集成的新高度。目前，硅光技术已经基本成熟，并开始在光通信系统上实现商用，美国创新公司 Acacia 的硅光子 100Gbps 相干光模块代表了硅光技术商用的最高水平。

硅光技术目前正引领着光网络产业的一次划时代的技术变革，将光通信产业从分立器件时代带入了自动化、规模化生产的集成芯片时代，其影响力不亚于从电子管时代进入晶体管集成电路时代给电子产业带来的巨大震撼。但硅材料本身并不是最完美的材料，相比于硅材料，将目前发现的二维材料石墨烯用于光电器件上，在理论上能够得到更大的带宽、更低的驱动电压和更小的尺寸，而且石墨烯的生产制备可以兼容硅基 CMOS 工艺，因而目前的硅光技术和工艺可以进一步移植到石墨烯器件的生产制备上。将来硅光、石墨烯技术作为一种平台技术，能够实现下一代全光网络的各种光交换、光路由、光逻辑、光存储和光信号处理器件，一旦光电器件的加工技术能够像微电子加工技术一样不断取得进步，利用光子晶体和人工介质材料的新型光电器件将在不远的未来走向实用，从物理上颠覆现有光网络中的器件种类和网络架构，实现光网络的大幅度简化和光通信产业的革命。

5.4.4 光网络的发展趋势

1. 光网络和 IP 网络的融合

互联网 IP 业务在传送网络中所占比重越来越大，将 IP 网络与光网络更好地配合起来，可

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

以为分组数据业务提供容量更大、粒度更灵活、更可靠和更智能的传送。光网络和 IP 网络的共同愿景，驱动着光网络的研究向着 IP 层与光层融合的方向发展。但是，基于分组交换的 IP 网络和基于电路交换的光网络的交换机制和组网模式有本质不同，二者实现动态互通和统一控制难度非常大，需要面对众多技术挑战。

光/IP 融合网络的统一控制架构需要考虑光网络物理层的限制，如光功率、物理损伤、信号可达性、连接建立速率、可用带宽、交换粒度等因素。

光网络与 IP 网络的业务建立（传送）方式不同，它们之间存在巨大的时延差异，即使在小规模情况下，商用的光传送网络业务建立时延也将达到几百毫秒到几秒量级，这对于 IP 网络中的时延敏感业务来说明显过高，构成光网络与 IP 网络互通的巨大障碍。为实现光网络与 IP 网络的无缝融合，目前已提出了一种基于“超级虚拟路由器”的光/IP 融合网络架构，以及一种基于该架构的“资源缓存”技术，可以实现 IP 业务在光传送网络上的无缝传输。

2. 光网络和无线网络的融合

与 IP 网络的融合相比，光网络和无线网络的融合面临一些更本质的问题。例如，现有动态光网络的业务源节点和目的节点都是固定的，不随时间的推移而发生变动。然而，这种情况将随着移动通信容量的增加及交通工具速度的提高而改变。在可以预见的未来，为高速铁路提供大容量通信的需求将给底层光网络带来类似“越区切换”的问题，导致业务的源/目的节点不再固定，光网络的路由模型由此将发生改变。

相比业务的“移动性”，在光/无线融合网络中，网络资源的“不确定性”将使问题更加复杂化。随着移动通信领域的大规模 MIMO 技术和 CoMP 技术的出现，灵活、大容量的按需无线覆盖成为可能。这将导致在光/无线融合网络中为移动业务计算路由和调度资源时，业务的源/目的节点和网络拓扑、链路资源都可能是不确定的，无法通过传统的网络模型解决。目前相关研究正处于起步阶段，有广阔的发展空间。

3. 细粒度全光交换网络

现有的全光电路交换只能提供波长级的大交换粒度，远大于现有 IP 网络中的业务粒度。这种粒度失配造成对光网络进行波长扩容无法带来有效网络容量的增加，导致光网络巨大的带宽资源难以得到充分利用。全光分组交换（OPS）和全光突发交换（OBS）可以提供亚波长级细粒度交换，但其依赖全光缓存及全光逻辑器件，这些器件目前尚不成熟。远低于波长粒度、不依赖光缓存的细粒度光交换及组网技术亟待突破。

为了支撑未来数据中心和高性能计算中心的业务需求，光网络必须具备细粒度、高灵活度的全光交换能力。目前可实现的远低于波长粒度的细粒度光交换技术主要为时域光交换技术，全光分组交换和全光突发交换技术是其代表。然而，在光缓存和光逻辑器件一直未能取得实质性突破的情况下，这两种技术均无法摆脱电处理过程，这导致 OPS/OBS 的能耗相比电交换没有质的降低，无法充分发挥光交换的优势。

为了克服 OPS/OBS 的局限，实现不依赖光缓存的无冲突超细粒度全光交换，目前又提出了全光时片交换（OTSS）技术。OTSS 技术从原理上可实现在无光缓存情况下的任意粒度无冲突全光交换，作为 OTSS 的使能技术，高精度网络时间同步和高速光开关已日趋成熟。典型的高精度网络时间同步协议 IEEE 1588v2 于 2008 年发布，由欧美发达地区和国家主导，这是

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

目前产业界主流的精确时间同步协议。中国移动已于 2014 年建成了全球首个基于 IEEE 1588v2 的商用高精度授时网络，实现了跨数千千米的 OTN 链路和 13 跳 PTN 链路以 225ns 为精度的时间同步精度。高速电光开关技术在 21 世纪初被日美公司垄断并蓬勃发展，多家公司都推出 4×4ns 级光开关商用产品，现在 16×16ns 级光开关原型产品已见报道，且我国在该方向的研究与国外基本处于同一水平。

4．网络控制

目前，单域光网络的智能控制问题已基本得到解决并逐步商用化，多域异构光网络的跨域控制问题也已取得巨大进展，已实现多厂商、多设备类型网络跨域互通的基本功能测试。随着云计算、物联网、数据中心、5G 移动通信等新型应用和网络业务的高速发展，作为信息网络的基础，光网络面临着和 IP 网络及无线网络在更广阔意义上的无缝动态异构融合，而这些难以通过现有光网络的控制架构实现。

思考与练习

1．电信网是由哪几部分构成的？

2．根据通信覆盖范围的不同，按照覆盖范围从小到大分，无线网络可划为哪几种？覆盖的范围各有多大？

3．IEEE 是怎样划分频谱的？什么是 ISM 频段？

4．我国分别是哪年开通 1G、2G、3G 和 4G 网络的？这 4 种网络的主要区别是什么？

5．第二代移动通信的三个演进阶段是什么？第三代移动通信的三种标准是什么？

6．4G 采用了什么核心技术？5G 的技术特点是什么？

7．双绞线接入网技术有哪些？光纤接入网的基本构成是什么？什么是混合光纤/同轴接入网？

8．谁是“光纤之父”？其主要成就是什么？光纤的导光原理是什么？

9．第一代、第二代和第三代光网络的特点分别是什么？

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

第6章

物联网支撑及应用技术

【学习要求】

（1）掌握嵌入式系统的结构、特点与处理器软件的特征。

（2）了解物联网中间件的结构分类与架构。

（3）掌握数据挖掘技术在物联网中的智能决策应用。

（4）了解云计算的基本概念和特点。

（5）了解 GIS 与 GPS 技术。

在高性能计算技术的支撑下，支撑层将网络内大量或海量的信息资源通过计算分析整合成一个可以互联互通的大型智能网络，为上层服务管理和大规模行业应用建立起一个高效、可靠和可信的支撑技术平台。例如，通过能力超级强大的中心计算及存储机群和智能信息处理技术，对网络内的海量信息进行实时高速处理，对数据进行智能化挖掘、管理、控制与存储。在支撑层，主要的系统支撑设备包括大型计算设备、海量网络存储设备等。

应用层根据用户的需求，构建面向各类行业实际应用的管理平台和运行平台，并根据各种应用的特点集成相关的内容服务。为了更好地提供准确的信息服务，必须结合不同行业的专业知识和业务模型，以完成更加精细和准确的智能化信息管理。例如，对自然灾害、环境污染等进行预测预警时，需要相关生态、环保等多学科领域的专门知识和行业专家的经验。在应用层，包括各类用户界面显示设备及其他管理设备。

6.1 嵌入式技术

物联网是新兴的通信应用网络，物联网的核心技术分布在嵌入式软件、RFID、传感器及传输数据计算领域。嵌入式系统显然是其中的“大脑”和“中枢神经”，物联网内的所有个体都需要嵌入式系统来传输和处理信息，嵌入式系统的好坏将直接影响物联网的运作。

6.1.1 嵌入式系统简介及应用

嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术和电子技术与各行业的具体应用相结合后的产物。国内普遍认同的嵌入式系统定义为：以应用为中心，以计算机技术为基础，软硬件可裁剪，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等严格要求的专用计算机系统。它一般由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统及用户的应用程序四部分组成，用于实现对其他设备的控制、监视或管理等功能。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

嵌入式系统具有非常广阔的应用前景，其应用领域包括工业控制、交通管理、信息家电、家庭智能管理系统、POS 网络及电子商务、环境工程与自然，以及机器人等。

基于嵌入式芯片的工业自动化设备将获得长足的发展，目前已经有大量的 8、16、32 位嵌入式微控制器正在应用。网络化是提高生产效率和产品质量、减少人力资源的主要途径，如工业过程控制、数字机床、电力系统、电网安全、电网设备监测、石油化工系统。同时，在车辆导航、流量控制、信息监测与汽车服务方面，嵌入式系统也获得了广泛的应用。内嵌 GPS 模块、GSM 模块的移动定位终端在各种运输行业获得了成功的使用。目前，GPS 设备已经进入了普通百姓的家庭。在家庭智能管理系统方面，水、电、煤气表的远程自动抄表，安全防火、防盗系统，其中已有的专用控制芯片将代替传统的人工检查，并实现更高、更准确和更安全的性能。在 POS 网络及电子商务方面，公共交通无接触智能卡发行系统、公共电话卡发行系统、自动售货机、各种智能 ATM 终端将全面走入人们的生活，实现手持一卡就可以行遍天下。嵌入式芯片的发展将使机器人在微型化、高智能方面的优势更加明显，同时会大幅度降低机器人的价格，使其在工业领域和服务领域获得更广泛的应用。

6.1.2 嵌入式系统的结构

嵌入式系统作为一类特殊的计算机系统，自底向上包含三部分，其结构如图 6-1 所示。

（1）硬件环境是整个嵌入式操作系统和应用程序运行的硬件平台，不同的应用通常有不同的硬件环境。硬件平台的多样性是嵌入式系统的一个主要特点。

（2）嵌入式操作系统完成嵌入式应用的任务调度和控制等核心功能，具有内核较精简、可配置、与高层应用紧密关联等特点。嵌入式操作系统具有相对不变性。

（3）嵌入式应用程序运行于操作系统之上，利用操作系统提供的机制可完成特定功能的嵌入式应用。不同的系统需要设计不同的嵌入式应用程序。

如何简捷有效地使嵌入式系统能够应用于各种不同的应用环境，是嵌入式系统发展中必须解决的关键问题。经过不断的发展，原先嵌入式系统的三层结构逐步演化成为一种四层结构，如图 6-2 所示，这个新增加的中间层叫作硬件抽象层，有时也叫板级支持包，是一个介于硬件与软件之间的中间层。硬件抽象层通过特定的上层接口与操作系统进行交互，向操作系统提供底层的硬件信息，并根据操作系统的要求完成对硬件的直接操作。硬件抽象层的引入大大推动了嵌入式操作系统的通用化。

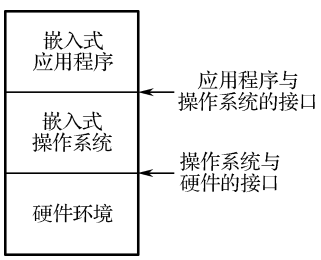


图 6-1　嵌入式系统的结构

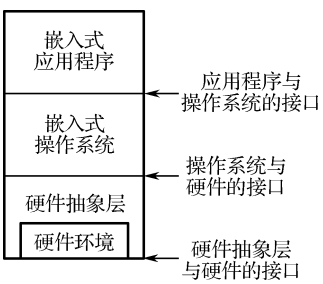


图 6-2　引入硬件抽象层后的嵌入式系统结构

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

6.1.3　嵌入式系统的特点

1. 嵌入式系统的高分散性

从某种意义上来讲，通用计算机行业的技术是垄断的。而嵌入式系统则不同，嵌入式系统工业是不可垄断的高度分散的工业，充满了竞争、机遇与创新，没有哪一个系列的处理器和操作系统能够垄断全部市场，虽然在体系结构上存在着主流，但各不相同的应用领域决定了不可能由少数公司、少数产品垄断全部市场。因此，嵌入式系统领域的产品和技术必然是高度分散的，留给各个行业高新技术公司的创新余地很大。

2. 嵌入式系统具有产品特征

嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的，不能独立于应用自行发展，否则便会失去市场。嵌入式处理器要针对用户的具体需求，对芯片配置进行更改才能达到理想的性能。嵌入式系统和具体应用有机地结合在一起，具有较长的生命周期。

6.1.4　嵌入式系统的体系结构

目前，嵌入式系统的体系结构包括以下两类。

（1）冯·诺依曼（Von Neumann）结构，也称普林斯顿结构，是一种将程序指令存储器和数据存储器合并在一起的存储器结构。冯·诺依曼结构的计算机的程序和数据共用一个存储空间，程序指令存储地址和数据存储地址指向同一个存储器的不同物理位置；采用单一的地址及数据总线，程序指令和数据的宽度相同。

（2）哈佛（Harvard）结构是一种将程序指令存储和数据存储分开的存储器结构，这是不同于一般 PC 的计算机体系结构。哈佛结构是一种并行体系结构，它的主要特点是将程序和数据存储在不同的存储空间中，即程序存储器和数据存储器是两个相互独立的存储器，每个存储器独立编址，独立访问。

6.1.5　嵌入式处理器软件的特征

嵌入式处理器的应用软件是实现嵌入式系统功能的关键，对嵌入式处理器系统软件和应用软件的要求也和通用计算机有所不同，主要有以下几点。

（1）软件要求固态化存储。为了提高执行速度和系统可靠性，嵌入式系统中的软件一般都固化在存储器芯片或嵌入式微控制器中，而不是存储于磁盘等载体中。

（2）软件代码要求高质量、高可靠性。尽管半导体技术的发展使处理器速度不断提高，片上存储器容量不断增加，但在大多数应用中，存储空间仍然是宝贵的，还存在实时性的要求。为此要求程序编写和编译工具的质量要高，以减小程序二进制代码长度，提高执行速度。

（3）系统软件的高实时性是基本要求。在多任务嵌入式系统中，对重要性各不相同的任务进行统筹兼顾的合理调度是保证每个任务及时执行的关键，单纯通过提高处理器速度是无法完成和没有效率的，这种任务调度只能由优化编写的系统软件来完成。

（4）嵌入式系统开发需要开发工具和环境。嵌入式系统本身不具备开发能力，设计完成以后用户通常也不能对其中的程序功能进行修改，必须有一套开发工具和环境才能进行开

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

发，这些工具和环境一般基于通用计算机上的软硬件设备及各种逻辑分析仪、混合信号示波器等。

（5）嵌入式系统软件需要实时多任务操作系统（RTOS）开发平台。通用计算机具有完善的操作系统和应用程序接口，它们是计算机基本组成不可分割的一部分，应用程序的开发及完成后的软件都在 RTOS 平台上运行，但一般不是实时的。嵌入式系统则不同，应用程序可以没有操作系统直接在芯片上运行；但是为了合理地调度多任务，以及利用系统资源，用户必须自行选配 RTOS 开发平台，这样才能保证程序执行的实时性、可靠性，并减少开发时间，保障软件质量。

（6）在嵌入式系统的软件开发过程中，采用 C 语言将是最佳和最终的选择。由于汇编语言是一种非结构化的语言，对于大型的结构化程序设计已经不能完全胜任了。这就要求采用更高级的 C 语言去完成这一工作。

6.1.6 物联网给嵌入式系统带来机遇

从全球范围来看，物联网产业化还处于新兴阶段。我国的物联网应用始终处于国际领先的水平，国家政策也给予了物联网产业较多的支持，多个国家科技重大项目都以物联网作为主要方向之一。国内先后有近百个单位开展了传感研究和应用，并建立起了中科院上海微系统所等研发和生产基地，取得了丰硕的成果。

嵌入式技术作为物联网系统工程的核心技术，与物联网产业的发展有着相互促进的作用。物联网嵌入式操作系统（Embedded Operating System，EOS）融合了物联网技术和计算机技术，它除具有通用操作系统的基本特点外，在小巧、可装卸等方面还有更为严格的要求，并且在操作系统设计上还要综合终端用户、制造商和第三方软件开发者的不同需求。目前常见的嵌入式操作系统主要是 Windows CE、Linux、Palm，这些系统各有优劣，从业者往往需要根据自己的实际需求进行选择和再次开发。但无论如何，嵌入式操作系统在物联网应用中的重要地位不容置疑，对于嵌入式系统从业者来讲，其中有着巨大的发展空间。物联网建设及现在国家对提升自身核心竞争力的大力提倡，给国内嵌入式系统行业带来的机遇不言而喻。我们要做的是快速提升自己的技术实力、产品价值，紧跟科技发展和国内经济建设的步伐，迅速成长，充分利用本土化的优势，缩小和国际竞争对手的差距，从而争取更大的市场空间。

6.2 物联网软件和中间件

物联网软件和中间件是继操作系统和数据库管理系统之后随着网络的兴起和发展而新兴的一种基础软件，可以视为位于网络各节点操作系统之上、网络应用系统之下的一层支撑软件。它处于物联网三层架构的中上层，是物联网系统的灵魂和中枢神经。

如果说软件是物联网的灵魂，中间件（Middleware）就是这个灵魂的核心。物联网中间件处于物联网的集成服务器端和感知层、传输层的嵌入式设备中，是介于前端读写器硬件模块和后端应用软件之间的重要环节，通过系统软件提供基础服务，可以连接网络上不同的应用系统，以达到资源和功能共享的目的。服务器端中间件称为物联网业务基础中间件，一般基于传统的中间件（应用服务器、ESB/MQ 等）构建，加入设备连接和图形化组态展示等模块；嵌入式中间件是一些支持不同通信协议的模块和运行环境。中间件的特点是它固化了很多通

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

用功能，但在具体应用中需要二次开发来实现个性化的行业业务需求，因此所有物联网中间件都要提供快速开发（RAD）工具，物联网中间件是物联网大规模应用的关键技术，也是物联网产业链的高端领域。

6.2.1　中间件体系结构

中间件体系结构图如图 6-3 所示。

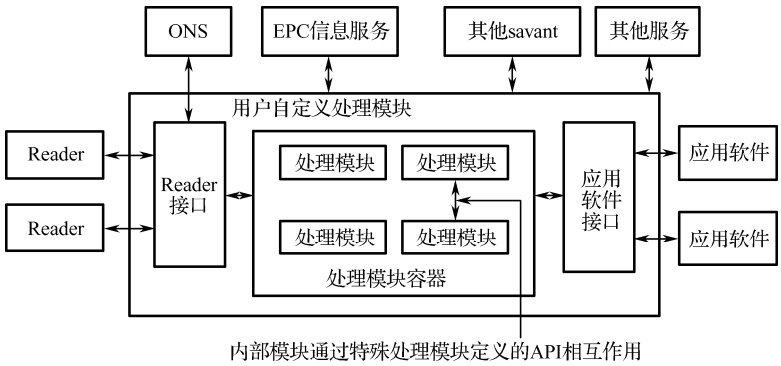


图 6-3　中间件体系结构图

中间件的特点有：满足大量应用的需要；运行于多种硬件和 OS 平台之上；支持分布计算，提供跨网络、硬件和 OS 平台的透明的应用或服务的交互；支持标准的协议；支持标准的接口。

由于标准接口影响可移植性、标准协议影响互操作性，所以中间件已成为许多标准化工作的主要部分。对于应用软件开发，中间件比操作系统和网络服务更重要，中间件提供的程序接口定义了一个相对稳定的高层应用环境，不管底层的计算机硬件和系统软件怎样更新换代，只要将中间件升级更新，并保持中间件对外的接口定义不变，应用软件几乎不用修改，从而保护了企业在应用软件开发和维护中的重大投资。

6.2.2　中间件的分类

中间件包括的范围十分广泛，针对不同的应用需求涌现出多种各具特色的中间件产品。但至今中间件还没有一个比较精确的定义，因此，在不同的角度或不同的层次上，对中间件的分类也会有所不同。由于中间件需要屏蔽分布环境中异构的操作系统和网络协议，它必须能够提供分布环境下的通信服务，这种通信服务称为平台。基于目的和实现机制的不同，将平台分为以下几类。

1．远程过程调用

远程过程调用是一种广泛使用的分布式应用程序处理方法。一个应用程序使用远程过程调用（RPC）来远程执行一个位于不同地址空间里的过程，并且从效果上看和执行本地调用相同。事实上，一个 RPC 应用分为两部分：服务器（Server）和客户端（Client）。Server 提供一个或多个远程过程，Client 向 Server 发出远程调用。Server 和 Client 可以位于同一台计算机，也可以位于不同的计算机，甚至运行在不同的操作系统之上。它们通过网络进行通信。相应的 Stub（一个只有一条出路的网络）和运行支持提供数据转换和通信服务，从而屏蔽不同的

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

操作系统和网络协议。RPC 通信在这里是同步的，并且采用线程可以进行异步调用。

在 RPC 模型中，Client 和 Server 只要具备了相应的 RPC 接口，并且具有 RPC 运行支持，就可以完成相应的互操作，而不必限制于特定的 Server。因此，RPC 为 Client/Servet 分布式计算提供了有力的支持。同时，远程过程调用所提供的是基于过程的服务访问，Client 与 Server 进行直接连接，没有中间机构来处理请求，因此也具有一定的局限性。比如，RPC 通常需要一些网络细节以定位 Server；在 Client 发出请求的同时，要求 Server 必须是活动的。

2. 面向消息的中间件

MOM 指的是利用高效可靠的消息传递机制进行平台无关的数据交流，并基于数据通信来进行分布式系统的集成。通过提供消息传递和消息排队模型，它可在分布环境下扩展进程间的通信，并支持多通信协议、语言、应用程序、硬件和软件平台。目前流行的 MOM 中间件产品有 IBM 公司的 MQ、BEA 公司的 MessageQ 等。消息传递和排队技术有以下三个主要特点。

（1）通信程序可在不同的时间运行。程序不在网络上直接相互通信，而是间接地将消息放入消息队列，因为程序间没有直接的联系，所以它们不必同时运行。消息放入适当的队列时，目标程序甚至根本不需要运行；即使目标程序在运行，也不意味着要立即处理该消息。

（2）对应用程序的结构没有约束。在复杂的应用场合中，通信程序之间不仅可以是一对一的关系，还可以采用一对多和多对一的方式，甚至是上述多种方式的组合。多种通信方式的构造并没有增加应用程序的复杂性。

（3）程序与网络复杂性相隔离。程序将消息放入消息队列或从消息队列中取出消息来进行通信，与此关联的全部活动，如维护消息队列、维护程序和队列之间的关系、处理网络的重新启动和在网络中移动消息等是 MOM 的任务，程序不直接与其他程序通信，并且它们不涉及网络通信的复杂性。

3. 对象请求代理

随着对象技术与分布式计算技术的发展，两者相互结合形成了分布对象计算，并发展为当今软件技术的主流方向。1990 年年底，对象管理集团（OMG）首次推出对象管理结构（Object Management Architecture，OMA），对象请求代理（Object Request Broker，ORB）是这个模型的核心组件。它的作用在于提供一个通信框架，透明地在异构的分布计算环境中传递对象请求。公共对象请求代理体系结构（CORBA）规范包括 ORB 的所有标准接口。1991 年推出的 CORBA1.1 定义了接口描述语言 OMGIDL 和支持 Client/Server 对象在具体的 ORB 上进行互操作的 API。CORBA 2.0 规范描述的是不同厂商提供的 ORB 之间的互操作。

对象请求代理是对象总线，它在 CORBA 规范中处于核心地位。定义异构环境下，对象透明地发送请求和接收响应的基本机制，是建立对象之间 Client/Server 关系的中间件。ORB 使得对象可以透明地向其他对象发出请求或接收其他对象的响应，这些对象可以位于本地，也可以位于远程机器。ORB 拦截请求调用，并负责找到可以实现请求的对象、传送参数、调用相应的方法、返回结果等。Client 对象并不知道同 Servcr 对象通信、激活或存储 Server 对象的机制，也不必知道 Server 对象位于何处，它是用何种语言实现的，使用什么操作系统或其他不属于对象接口的系统成分。值得指出的是 Client 和 Server 角色只用来协调对象之间的相互作用，根据相应的场合，ORB 上的对象可以是 Client，也可以是 Server，甚至两者兼有。当对

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

象发出一个请求时，它处于 Client 角色；当它接收请求时，它就处于 Server 角色。大部分的对象都是既扮演 Client 角色又扮演 Server 角色。另外，由于 ORB 负责对象请求的传送和 Server 的管理，Client 和 Server 之间并不直接连接，因此，与 RPC 所支持的单纯的 Client/Server 结构相比，ORB 可以支持更加复杂的结构。

4. 事务处理监控

事务处理监控（Transaction Processing Monitors）最早出现在大型机上，为其提供支持大规模事务处理的可靠运行环境。随着分布计算技术的发展，分布应用系统对大规模的事务处理提出了需求，如商业活动中大量的关键事务处理。事务处理监控界于 Client 和 Server 之间，进行事务管理与协调、负载平衡、失败恢复等，以提高系统的整体性能。它可以被看作事务处理应用程序的“操作系统”。总体上来说，事务处理监控有以下功能。

① 进程管理，包括启动 Server 进程，为其分配任务，监控其执行并对负载进行平衡。

② 事务管理，即保证在其监控下的事务处理的原则性、一致性、独立性和持久性。

③ 通信管理，为 Client 和 Server 之间提供多种通信机制，包括请求响应、会话、排队、订阅发布和广播等。

事务处理监控能够为大量的 Client 提供服务，如飞机定票系统。如果 Server 为每一个 Client 都分配其所需要的资源的话，那么 Server 将不堪重负。但实际上，在同一时刻并不是所有的 Client 都需要请求服务，而一旦某个 Client 请求了服务，它希望得到快速的响应。事务处理监控在操作系统之上提供一组服务，对 Client 请求进行管理并为其分配相应的服务进程，使 Server 在有限的系统资源下能够高效地为大规模的客户提供服务。

5. 数据访问中间件

数据访问中间件的作用是通过为异构环境中的服务和资源提供统一的观测结果，简化用户界面。中间件位于计算机硬件和操作系统之上，是一种独立的、支持应用软件开发和运行的系统软件，它能够使应用软件相对独立于计算机硬件、操作系统平台和数据库管理系统等基础环境，为大型分布式应用搭建一个标准化平台，并把大型分散的系统技术组合在一起，实现大型应用软件系统的集成。数据库访问中间件是应用最广泛、技术最成熟的一种。在需要进行大量数据通信的高性能处理场合中，当网络发生故障时，数据访问中间件不能正常工作。

中间件能够屏蔽操作系统和网络协议的差异，为应用程序提供多种通信机制，并提供相应的平台以满足不同领域的需要。因此，中间件为应用程序提供了一个相对稳定的高层应用环境。然而，中间件所应遵循的一些原则离实际还有很大距离。多数流行的中间件服务使用专有的 API 和专有的协议，使得应用建立于单一厂家的产品之上，导致来自不同厂家的中间件产品很难实现相互操作。有些中间件服务只提供一些平台的实现，从而限制了应用在异构系统之间的移植。应用开发者在这些中间件服务之上建立自己的应用还要承担相当大的风险，随着技术的发展，他们往往还要重写他们的系统。尽管中间件服务提高了分布计算的抽象化程度，但应用开发者还面临许多艰难的设计选择，如开发者还要决定分布应用在 Client 方和 Server 方的功能分配。通常将表示服务放在 Client 以方便使用显示设备，将数据服务放在 Server 以靠近数据库，但也并非总是如此，何况其他应用功能如何分配也是不容易确定的。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

6.2.3 物联网中间件架构

物联网企业信息交互的中间件设计结合了上一节提到的四类中间件的特点：远程对象调用、面向消息的中间件、对象代理、事务管理。

远程对象调用：中间件开发过程当中的主流技术就是 J2EE 技术，而 J2EE 技术是基于 CORBAR 和 RMI 的，远程对象调用是 J2EE 项目的主要调用方法。这样能够在最大程度上实现分布式的软件体系结构。

面向消息的中间件：在实现中间件的过程中，Java 消息服务（JMS）是实现其中重要功能模块的主要技术。这样有利于以后的系统集成整合。

对象代理：CORBAR 技术和 SOA 设计理念都涉及对象代理和服务总线的概念，而在中间件开发的后期，将会以 SOA 的形式通过 Web Service 发布在企业服务总线上，方便客户端的调用。

事务管理：J2EE 当中的 EJB 技术明确地规范了事务操作和事务管理，并且有相应的 J2EE 容器来对中间件当中的事务进行管理。

物联网中间件体系结构如图 6-4 所示。

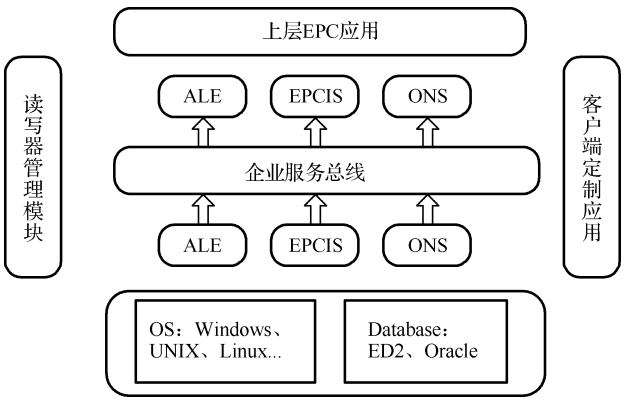


图 6-4 物联网中间件体系结构

6.3 数据库与数据挖掘技术

物联网带来了许多挑战，特别是在数据库管理系统领域。例如，智能城市中应用的基于物联网的交通传感器将实时生成大量的交通数据。数据库在充分处理物联网数据方面发挥着非常重要的作用。

如果把物联网比喻成人体的话，传感器好比五官、皮肤，传输机制好比神经，应用层好比人体主动或被动的行为或反应，而数据库无疑就是大脑，数据库在整个物联网中发挥着记忆（数据存储）、分析（数据挖掘）的作用。生物进化的最后一步就是大脑的发育成熟，所以拥有发育成熟的大脑是智慧生物的标志，有了大脑，我们才能长期记忆、思考、分析，传授知识。同样，没有数据库的物联网是不完整的，选错数据库的物联网是不完美的，而一个完整、完美的物联网系统必定需要一个最匹配的数据库。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

6.3.1　数据挖掘介绍

数据挖掘（Data Mining），又称数据库中的知识发现（Knowledge Discovery in Database，KDD），比较公认的定义是由 U.M.Fayyad 等人提出的：数据挖掘就是从大量的、不完全的、有噪声的、模糊的、随机的数据集中，提取隐含在其中的、人们事先不知道的、但又是潜在的有用的信息和知识的过程，提取的知识表示为概念（Concepts）、规则（Rules）、规律（Regularities）、模式（Patterns）等形式。数据挖掘是一种决策支持过程，分析各组织原有的数据，做出归纳推理，从中挖掘出潜在的模式，为管理人员决策提供支持。

1．数据挖掘分析

数据挖掘技术基本上分为两大类：描述型数据挖掘和预测型数据挖掘。下面对这两种挖掘技术进行说明。

（1）描述型数据挖掘是在预先未知的数据中寻找哪些模式是有价值的技术。下面是描述型挖掘技术的一些术语。

① 分群：该技术尝试根据数据记录的相似性对其进行分组，使群与群之间差别很明显，而同一个群中的数据尽量相似。比如，数据记录中可能包含对每个顾客的描述。这种情况下，分群将把类似的顾客归组到一起，同时最大限度地体现按此方式组成的不同顾客组之间的差异。分群技术有很多，针对不同的数据群集，每种技术都有自己的方法。

② 关联分析：是用来描述确定数据记录间关联的一系列技术。最为人熟知的关联分析类型是市场购物篮分析。该情况下数据记录的是顾客在同一次事务中购买的物品，由于该技术来源于超市数据的分析，因此称这些物品在同一个购物篮中。市场购物篮分析可发现不同顾客所购买的物品组合，通过相互联系（或链接），可以总结出哪些类型的产品是在一起购买的。关联分析不仅限于市场购物篮分析，如果将市场购物篮看作一组数据或一组记录，那么在任何情况下只要存在大量的数据记录，就可以使用该技术。

（2）预测型数据挖掘是在数据中查找特定变量（称为“目标变量”）与其他变量之间关系的技术。下面是预测型数据挖掘技术的一些术语。

① 分类：要解决的问题是将一个事件或对象归类，是指将数据记录分配到预先定义的类别中。在使用上，既可以用此模型分析当前已存在的数据，也可以用它来预测将来未知的数据。例如，将顾客分配到市场区。这种情况下，目标变量就是类别，该技术发现其他变量和类别之间的关系。当对新的记录归类时，该技术可确定类别和记录属于该类别的可能性。分类技术包括决策树、神经网络和径向基函数（RBF）、分类挖掘等。

② 预测：指的是根据数据记录中的其他变量预测某个连续变量的值。例如，根据顾客的年龄、性别和收入来预测他的大概支出。最常用的数值预测技术包括线性和多项式回归，数据挖掘将这些技术扩展到其他技术，如神经元和 RBF 值预测。

2．数据挖掘的步骤

在各种硬件和软件都具备的情况下可以开始进行数据挖掘的工作。

1）数据准备

数据准备包括所有从原始的未加工的数据构造中分析数据集的活动，是数据挖掘过程中

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

最耗时的环节、最占工作量的一步。数据准备工作流程如图 6-5 所示。

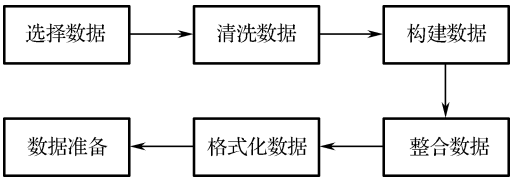


图 6-5　数据准备工作流程

数据准备过程包括：

① 确定项目目标，建立挖掘计划；

② 分析变量的获取；

③ 数据收集和获取；

④ 数据集成。

首先必须明确项目的目标，这个目标应该是适于用选取的聚类分析方法来达到的。之后就应该对分析变量进行全面获取，数据挖掘需要大量的基础数据，在确定了分析目标和执行方案后，需要对各个数据源的数据进行分析、整理并集成，以确定需要哪些方面的数据，然后将它们汇总起来，形成这次分析任务的数据库。数据集成的目的是建立统一的数据视图。

2）*数据挖掘*

数据挖掘是对前一阶段的数据进行分析，常用的有分类和聚类两类方法。

分类的一般过程为用分类算法分析训练数据，然后用检验数据评估分类规则的准确率。常见的分类算法有朴素贝叶斯、决策树、支持向量机、k-最近邻分类、遗传算法、神经网络、逻辑回归方法等。

聚类是无监督的学习。聚类的常见算法有 k-均值（k-Means）和 k-中心点，是基于抽象距离的算法（实际度量为密度、网格等）；均值漂移聚类，是基于滑动窗口的算法，找到数据点的密集区域；基于密度的聚类方法（DBSCAN）。

3）*表述*

与验证型工具一样，数据挖掘将获取的信息以全球用户理解和观察的方式反映给用户，这时可以利用可视化工具。由于用户要求的不同，数据挖掘分析的数据的范围会有所不同，如分析一年内或六个月内的销售情况，或者分析南部地区和东部地区的销售情况，这样系统会得出不同的结论。这些基于不同数据集合的分析结果除通过可视化工具提供给用户外，还可以存储在知识库中，供日后进一步分析和比较。

4）*模型评估*

数据挖掘最终的目的就是建立业务模型，以投入实际中做一些分类或预测的事情，通过上面的处理，就会得到一系列的分析结果和模型，并将挖掘结果与实际情况进行比较。在此步骤，如果分析人员对分析结果不满意，模型对验证数据集预测不够准确，则还需要回到前面的步骤进行调整和优化。

6.3.2　数据挖掘的实现和前景

数据挖掘综合利用人工智能、机器学习、统计学等技术为用户服务，但是仅有先进的技

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

术是不够的，如何让挖掘技术为用户掌握、帮助用户解决实际问题才是数据挖掘产品能否走向市场的关键。一个成熟的数据挖掘产品除需要先进的技术外，还需要达到如下要求。

（1）对所需解决的问题的深入了解。

（2）易于使用。

（3）系统的开放性，特别是要能与关系数据库集成。

数据挖掘技术是一个新兴的研究领域，每年都有新的数据挖掘方法和模型问世，人们对对它的研究正日益深入和广泛，尽管数据挖掘还面临诸多问题，但我们有理由相信，在不久的将来，数据挖掘发挥的作用和价值会越来越大。

6.4　数据处理与云计算

“云计算”一词用来同时描述一个系统平台和一种类型的应用程序。一个云计算的平台按需进行动态部署（Provision）、配置（Configuration）、重新配置（Reconfigure）及取消服务（Deprovision）等。云计算平台中的服务器可以是物理的服务器或虚拟的服务器。高级的计算云通常包含一些其他的计算资源，如存储区域网络（SANS）、网络设备、防火墙及其他安全设备等。云计算描述了一种可以通过互联网进行访问的可扩展的应用程序。“云应用”使用大规模的数据中心及功能强劲的服务器来运行网络应用程序与网络服务。任何一个用户通过合适的互联网接入设备及一个标准的浏览器就能够访问一个云计算应用程序。

云计算有两方面的含义：一方面它描述了基础设施，用来构造应用程序，其地位相当于PC 上的操作系统；另一方面它描述了建立在这种基础设施之上的云计算应用。网格计算将一个大任务分解成很多小任务并行运行在不同的集群及服务器上，注重科学计算应用程序的运行。而云计算是一个具有更广泛含义的计算平台，能够支持非网格的应用，如支持网络服务程序中的前台网络服务器、应用服务器、数据库服务器三层应用程序架构模式，以及支持当前 Web 2.0 模式的网络应用程序。云计算是能够提供动态资源池、虚拟化和高可用性的下一代计算平台。现有的云计算实现使用的技术体现了以下三个方面的特征。

① 硬件基础设施架构在大规模的廉价服务器集群之上。与传统的性能强劲但价格昂贵的大型机不同，云计算的基础架构大量使用了廉价的服务器集群，特别是 x86 架构的服务器节点之间的互联网络一般也使用千兆以太网。

② 应用程序与底层服务协作开发，最大限度地利用资源。传统的应用程序建立在完善的基础结构（如操作系统）之上，利用底层提供的服务来构造应用。而云计算为了更好地利用资源，采用了底层结构与上层应用共同设计的方法来完善应用程序的构建。

③ 通过多个廉价服务器之间的冗余，使用软件获得高可用性。由于使用了廉价的服务器集群，节点的失效将不可避免，并且会有节点同时失效的问题。为此，在软件设计上需要考虑节点之间的容错问题，使用冗余的节点获得高可用性。

通过上面的技术手段，云计算达到了两个分布式计算的重要目标：可扩展性和高可用性。可扩展性表示云计算能够无缝地扩展到大规模的集群之上，甚至可以数千个节点同时处理。高可用性代表了云计算能够容忍节点的错误，甚至有很大一部分节点发生失效也不会影响程序的正确运行。

Google 公司拥有强大的搜索引擎。除搜索业务外，Google 公司还有 Google Maps、Google

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

Earth、Gmail、YouTube 等各种业务，包括刚诞生的 Google Wave。这些应用的共性在于数据量巨大，而且要面向全球用户提供实时服务。因此，Google 公司必须解决海量数据存储和快速处理问题。Google 公司成功的关键在于它发展出简单而又高效的技术，让多达百万台的廉价计算机协同工作，共同完成这些前所未有的任务，这些技术在诞生几年之后才被命名为 Google 云计算技术。Google 云计算技术具体包括 Google 文件系统 GFS、分布式计算编程模型 Map-Reduce、分布式锁服务 Chubby 和分布式结构化数据表 Bigtable。其中，GFS 提供了海量数据的存储和访问的能力，Map-Reduce 使得海量信息并行处理变得简单易行，Chubby 保证了分布式环境下并发操作的同步问题，Bigtable 使得海量数据的管理和组织十分方便。

1. Google 文件系统 GFS

GFS 的系统构架如图 6-6 所示，GFS 将整个系统的节点分为三类角色：客户端、主服务器和数据块服务器。客户端是 GFS 提供给应用程序的访问接口，它是一组专用接口，以库文件的形式提供。应用程序直接调用这些库函数，并与该库链接在一起。主服务器是 GFS 的管理节点，在逻辑上只有一个，它保存系统的元数据，负责整个文件系统的管理，是 GFS 文件系统中的“大脑”。数据块服务器负责具体的存储工作。数据以文件的形式存储在数据块服务器上，数据块服务器可以有多个，它的数目直接决定了 GFS 的规模。GFS 将文件按照固定大小进行分块，默认是 64MB，每一块称为一个数据块（Chunk），每个数据块都有一个对应的索引号（Index）。

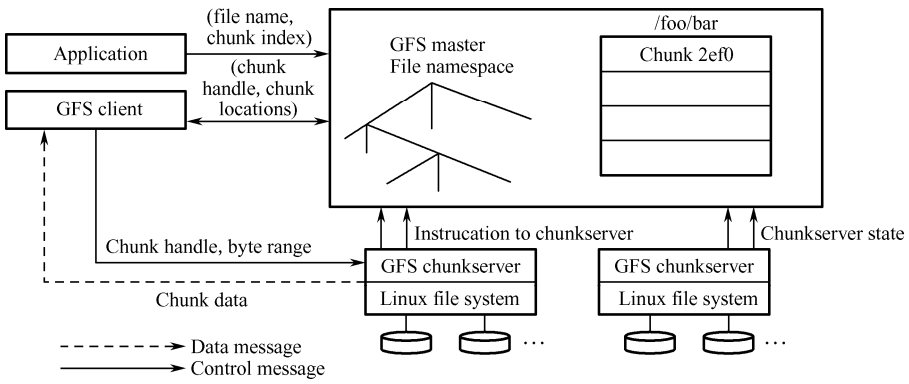


图 6-6　GFS 的系统构架

客户端在访问 GFS 时，首先访问主服务器节点，获取将要与之进行交互的数据块服务器信息，然后直接访问这些数据块服务器完成数据存取。GFS 的这种设计方法实现了控制流与数据流的分离。客户端和主服务器之间只有控制流，而无数据流，这样就极大地降低了主服务器的负载，使之不成为系统性能的一个瓶颈。客户端和数据块服务器之间直接传输数据流，同时由于文件被分成多个数据块进行分布式存储，客户端可以同时访问多个数据块服务器，从而使得整个系统的 I/O 高度并行性能得到提高。

相对于传统的分布式文件系统，GFS 针对 Google 应用的特点从多方面进行了简化，从而在一定规模下达到成本、可靠性和性能的最佳平衡。它具有以下几个特点：

（1）采用中心服务器模式；

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

（2）不缓存数据；
（3）在用户态下实现；
（4）只提供专用接口。

2. Map-Reduce

Map-Reduce 是 Google 公司提出的一个软件架构，是一种处理海量数据的并行编程模式，用于大规模数据集（通常大于 1TB）的并行运算。“Map”“Reduce”的概念和主要思想，都是从函数式编程语言和矢量编程语言借鉴而来的。正是由于 Map-Reduce 有函数式和矢量编程语言的共性，使得这种编程模式特别适合于海量数据的搜索、挖掘、分析和机器智能学习等。

Map-Reduce 的运行模型如图 6-7 所示。图中有 *M* 个 Map 操作和 *R* 个 Reduce 操作。简单地说就是一个 Map 函数对一部分原始数据进行指定的操作。每个 Map 操作都针对不同的原始数据，因此 Map 与 Map 之间是互相独立的，这就使得它们可以充分并行化。一个 Reduce 操作对每个 Map 所产生的一部分中间结果是互补交叉的，所有 Reduce 产生的最终结果经过简单连接形成了结果集，因此 Reduce 也可以在并行环境下执行。

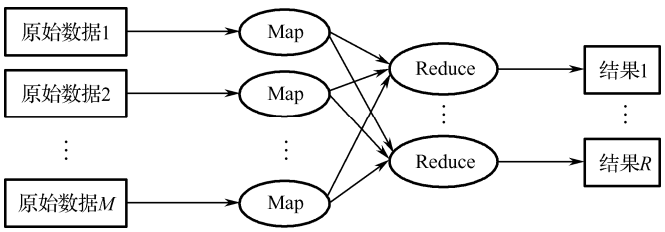


图 6-7　Map-Reduce 运行模型

3. 分布式锁服务 Chubby

Chubby 是 Google 公司设计的提供粗粒度锁服务的一个文件系统，它基于松耦合分布式系统，解决了分布的一致性问题。通过使用 Chubby 的锁服务，用户可以确保数据操作过程中的一致性。不过值得注意的是，这种锁只是一种建议性的锁，而不是强制性的锁，如此选择的目的是使系统具有更大的灵活性。GFS 使用 Chubby 来选取一个 GFS 主服务器，Bigtable 使用 Chubby 指定一个主服务器并发现、控制与其相关的子表服务器。

如图 6-8 所示是 Chubby 的基本架构，Chubby 被划分成两部分：客户端和服务器端。客户端和服务器端之间通过远程过程调用来连接。在客户端，每个客户应用程序都有一个 Chubby 程序库，客户端的所有应用都是通过调用这个库中的相关函数来完成的。服务器端称为 Chubby 单元，一般由五个被称为副本的服务器组成，这五个副本在配置上完全一致，并且在系统刚开始时处于对等地位。这些副本通过 quorum 机制（简单来说就是按少数服从多数的选举原则产生一个决议）选举产生一个主服务器，对应的时间就称为主服务器租约期。如果某个服务器被连续推选为主服务器，则这个租约期就会不断地被更新。租约期内，所有的客户请求都是由主服务器来处理的。客户端如果需要确定主服务器的位置，则可以向 DNS 发送一个主服务器定位请求，非主服务器的副本将对该请求做出回应。通过这种方式，客户端能够快速、准确地对主服务器做出定位。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

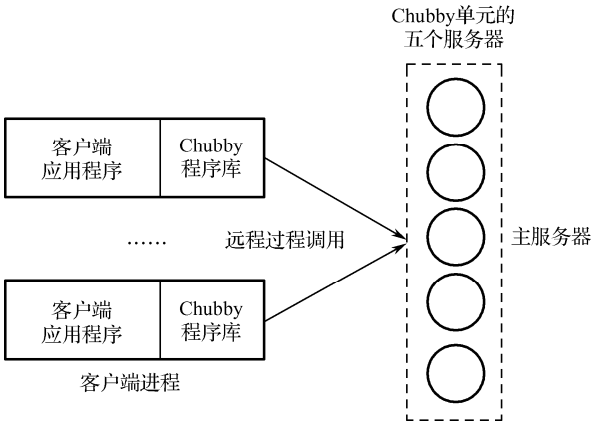


图 6-8　Chubby 的基本架构

4. 分布式结构化数据表 Bigtable

Bigtable 是在 Google 公司的另外三个云计算组件基础之上构建的，其基本架构如图 6-9 所示。WorkQueue 是一个分布式的任务调度器，它主要被用来处理分布式系统队列的分组和任务调度。在 Bigtable 中 GFS 主要用来存储子表数据以及一些日志文件，Chubby 的主要作用是选取并保证同一时间内只有一个主服务器获取子表位置信息、保存 Bigtable 的模式信息及访问控制列表。

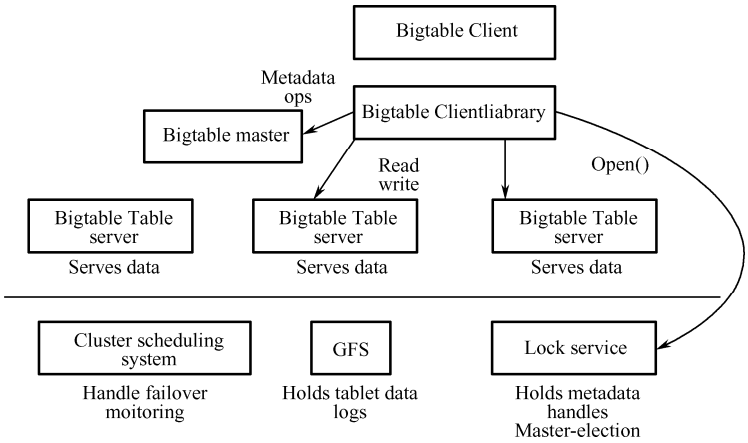


图 6-9　Bigtable 基本架构

Bigtable 主要由链接到客户程序中的库、一个 Master 服务器和多个 Table 服务器三部分组成。从图 6-9 中可以看出，客户需要访问 Bigtable 服务时首先要利用其库函数执行 Open()操作来打开一个锁（实际上就是获取文件目录），锁打开以后客户端就可以和子表服务器进行通信了。和许多具有单节点的分布式系统一样，客户端主要与子表服务器通信，几乎不和主服务器进行通信，这使得主服务器的负载大大降低。主服务器主要进行一些元数据的操作，以及对子表服务器之间的负载调度等，实际的数据是存储在子表服务器上的。

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

6.5　GIS 和 GPS 技术

地理信息系统（Geographic Information System，GIS）、全球定位系统（Global Positioning System，GPS）是在计算机、通信、卫星、测量、航天、航空等高新技术飞速发展下，逐渐发展起来的，并成为数字地球、智能交通系统等的最基础和基本的核心技术，被越来越多的部门采用。作为实时、客观获取空间信息的新兴技术手段，GPS 成为 GIS 的重要数据来源，而通过 GIS 对其获得的数据进行处理和分析，可以提取各种有用信息，以进行决策支持。

6.5.1　GIS 系统介绍

1. GIS 系统概述

GIS 是表征地理系统诸要素的数量、质量、分布特征、相互联系和变化规律的数字、文字、图像和图形等的总称。地理信息属于空间信息，其位置的识别是与数据联系在一起的，这是地理信息区别于其他类型信息的最重要的标志。地理信息系统是通过经纬度或公路网建立地理坐标来实现空间位置识别的。地理信息还具有多维结构的特征，即在二维空间的基础上实现多专题的第三维结构。而各个专题之间的联系是通过属性码进行的，这为地理信息系统各图层之间的综合研究提供了可能，也为地理系统多层次的分析、信息传输和筛选提供了方便。

2. GIS 系统的特点

地理信息系统包含五项基本功能：数据采集与编辑、数据库管理、空间查询和分析、地形分析、制图。

地理信息系统集计算机图形和数据库于一体，存储并处理空间信息，它把地理位置和相关属性有机结合起来，根据实际需要准确真实、图文并茂地输出给用户，满足城市建设、企业管理、居民生活对空间信息的要求。

与一般的管理信息系统相比，地理信息系统有以下特征。

（1）地理信息系统在分析处理问题中使用了空间数据和属性数据，并通过数据库管理系统将两者结合起来，共同管理、分析和应用。

（2）地理信息系统强调空间分析，通过利用空间分析解析式模型来分析空间数据。

（3）地理信息系统的成功应用不仅取决于技术体系，而且依靠一定的组织体系（包括实施人员、系统管理员、技术操作员、系统开发设计者等）。

（4）人的因素在地理信息系统的发展过程中起着越来越重要的作用。

3. GIS 系统的应用领域

GIS 在多个领域中均具有广泛的应用，大致可分为以下八方面。

1）资源管理

GIS 是一个具有结构和功能的系统，能获取和输入空间数据，进行空间数据的处理和分析，并将结果按一定的方式输出。通过这种方式，各个行业的信息资源都可以按各自的要求进行处理，从而提高了信息资源的管理和利用效率。各个行业信息系统的建设就是典型的例子，

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

如地籍信息系统、林业资源管理信息系统、自来水设施管理信息系统、矿产资源管理信息系统、污染源管理信息系统、旅游资源管理信息系统、地下水资源管理信息系统等，对资源的分布存在空间模式进行管理分析。自然资源 GIS 目前主要进行自然环境作用分析、野生动植物保护、森林保护、地下水模拟与污染跟踪等。

2）资源配置

在城市中各种公用设施、救灾减灾中物资的分配、全国范围内能源保障、粮食供应等机构在各地的配置等都是资源配置问题。GIS 在这类应用中的目标是保证资源的最合理配置和发挥最大效益。

3）城市规划和管理

空间规划是 GIS 的一个重要应用领域，城市规划和管理是其中的主要内容。例如，在大规模城市基础设施建设中如何保证绿地的比例和合理分布，如何保证学校、公共设施、运动场所、服务设施等能够有最大的服务面（城市资源配置问题）等。

4）生态、环境管理与模拟

这包括区域生态规划、环境现状评价、环境影响评价、污染物削减分配的决策支持、环境与区域可持续发展的决策支持、环保设施的管理、环境规划等。

5）基础设施管理

城市的地上地下基础设施，电信、自来水、道路交通、天然气管线、排污设施、电力设施等广泛分布于城市的各个角落，并且这些设施明显具有地理参照特征。它们的管理、统计、汇总都可以借助 GIS 完成，而且可以大大提高工作效率。

6）选址分析

根据区域地理环境的特点，综合考虑资源配置、市场潜力、交通条件、地形特征、环境影响等因素，在区域范围内选择最佳位置，是 GIS 的一个典型应用领域，充分体现了 GIS 的空间分析功能。

7）分布式地理信息应用

随着网络和 Internet 技术的发展，运行于 Internet 环境下的地理信息系统应用的目标是实现地理信息的分布式存储和信息共享，以及远程空间导航等。

8）地学研究与应用

地形分析、流域分析、土地利用研究、经济地理研究、空间决策支持、空间统计分析、制图等都可以借助地理信息系统工具完成。地图信息系统就是一个很好的地学分析应用软件系统。

6.5.2 GPS 系统介绍

进入 20 世纪以后，随着科学技术水平的不断提高，人类逐渐发明了许多新的定位方法。为了实现全天候、全球性和高精度的连续导航与定位，1973 年美国国防部批准其陆海空三军联合研制第二代卫星导航定位系统——授时与测距导航系统/全球定位系统，简称全球定位系统（GPS）。

GPS 主要有三大组成部分，即空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分。GPS 的空间星座部分中 24 颗卫星基本均匀分布在 6 个轨道平面内，轨道平面相对赤道平面的倾角为 55°，各轨道平面之间的交角为 60°，每个轨道平面内的卫星相差 90°，任一个轨道平面上的

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

卫星比西边相邻轨道平面上的相应卫星超前 30°。卫星轨道平均高度为 20200km，卫星运行周期为 11 小时 58 分。每颗卫星每天约有 5 个小时在地平线以上，同时位于地平线以上的卫星数目随时间和地点而不同，可为 4～11 颗。GPS 的地面监控部分目前主要由分布在全球的 5 个地面站组成，其中包括卫星检测站、主控站和信息注入站。GPS 的空间部分和地面监控部分是用户广泛应用该系统进行导航和定位的基础，均为美国所控制。GPS 的用户设备主要由接收机硬件和处理软件组成。用户通过用户设备接收 GPS 卫星信号，经信号处理而获得用户位置、速度等信息，最终实现利用 GPS 进行导航和定位的目的。

GPS 采用高轨测距体制，以观测站至 GPS 卫星的距离作为基本观测量。为了获得距离观测量，主要采用两种方法：一是测量 GPS 卫星发射的测距码信号到达用户接收机的传播时间，即伪距测量；二是测量具有载波多普勒频移的 GPS 卫星载波信号与接收机产生的参考载波信号之间的相位差，即载波相位测量。采用伪距测量定位速度最快，而采用载波相位测量定位精度最高。通过对 4 颗或 4 颗以上的卫星同时进行伪距或相位的测量即可推算出接收机的三维位置。

6.6　微机电技术

微机电系统（MEMS）是微电子技术的拓宽和延伸，它将微电子技术和精密机械加工技术相互融合，实现了微电子与机械融为一体的系统。MEMS 主要包含微型传感器、执行器和相应的处理电路三部分。作为输入信号的自然界各种信息首先通过传感器转换成电信号，经过信号处理以后（模拟/数字）再通过微执行器对外部世界发生作用。传感器可以把能量从一种形式转化为另一种形式，从而将现实世界的信号（如热、运动等信号）转化为系统可以处理的信号（如电信号）。执行器根据信号处理电路发出的指令完成人们所需要的操作。信号处理电路则可以对信号进行转换、放大和计算等处理。MEMS 技术的目标是通过系统的微型化、集成化来探索具有新原理、新功能的元件和系统。它将在 21 世纪的信息、通信、航空航天、生物医疗等多方面获得重大突破，从而对世界科技、经济发展和国防建设带来深远的影响。

1. MEMS 技术特点

MEMS 技术特点是微型化、多样化、微电子化、批量生产、多学科交叉等。

（1）微型化：MEMS 体积小（芯片的特征尺寸为纳米/微米级）、质量轻、功耗低、惯性小、谐振频率高、响应时间短。例如，一个压力成像器的微系统含有 1024 个微型压力传感器，整个膜片尺寸仅为 10mm×10mm，每个压力芯片尺寸为 50μm×50μm。

（2）多样化：MEMS 包含有数字接口、自检、自调整和总线兼容等功能，具备在网络中应用的基本条件，具有标准的输出，便于与系统集成在一起，而且能按照需求灵活地设计制造更多样化的 MEMS。

（3）微电子化：采用 MEMS 工艺，可以把不同功能、不同敏感方向或运动方向的多个传感器或执行器集成于一体，或形成微传感器阵列、微执行器阵列，甚至把多种功能的器件集成在一起，形成复杂的微系统。微传感器、微执行器和微电子器件的集成可制造出可靠性、稳定性很高的微电子机械系统。

（4）批量生产：用硅微加工工艺在同一硅片上同时可制造出成百上千个微型机电装置或

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

完整的 MEMS，批量生产可大大降低生产成本。

（5）多学科交叉：MEMS 涉及电子、机械、材料、制造、信息与自动控制、物理、化学和生物等多学科，并集成了当今科学发展的许多尖端成果。

2. MEMS 研究内容

MEMS 研究的内容极为广泛。其关键技术有设计技术、材料、制作工艺和测试技术。

1）设计技术

MEMS 产品设计包括系统、器件、电路和封装等设计。

MEMS 器件的设计需要综合多学科理论分析，这大大增加了设计参数选择的难度，常规分析计算已无法满足设计需要。计算机技术的进步使得 CAD 技术在 MEMS 器件设计中得到广泛的应用，采用 CAD 能设计出低成本、高性能、更复杂的新型系统。2D 和 3D 计算机绘图技术的发展能够对复杂的 MEMS 结构及版图进行计算机设计，有限元分析技术的应用可以用精确的计算机数值求解方法来分析和预测器件的性能，使器件的静态、准静态和动态模拟成为可能，从而能够对 MEMS 器件的结构和工艺进行计算机模拟和设计优化。

2）材料

MEMS 应用的材料主要有单晶硅、多晶硅、压电材料和其他类型合成材料。

① 硅材料：硅的机械性能好，硅的强度、硬度和杨氏模量与铁相当，密度接近铝，热传导性接近钼和钨。20 世纪 60 年代，MEMS 刚出现时，IC 工业应用的半导体材料只有单晶硅衬底和多晶硅薄膜两种。

② 压电材料：开发研究表明，压电材料是制作 MEMS 的良好材料。MEMS 材料的一个明显的变化是用单晶石英取代硅。石英也是一种高性能的晶体，虽然批量生产不如硅，但可以进行定向腐蚀，已用于制造压力传感器、加速度计和陀螺。

③ 合成材料：最近几年材料结构的控制技术发展很快，未来，MEMS 应用的新材料包括化合物材料、高温超导材料、磁阻材料、铁电材料、热点材料以及许多其他功能的材料。这些材料是专门为 MEMS 传感器研究和开发的。

3）制作工艺

微机械加工技术是制作微传感器、微执行器和微电子机械系统的关键技术。

微机械加工工艺分为硅基加工和非硅基加工。硅基加工技术比较成熟，硅的力学性能较好，适合做微型机械。硅基工艺包括表面加工（牺牲层技术）、体加工（各向异性刻蚀技术）、SPB（硅直接键合）、LIGA 和准 LIGA 加工，非硅基加工包括微电火花加工、微电铸、激光加工、STM 和 AFM 等。

MEMS 技术首先是在微电子平面加工工艺基础上发展起来的，又先后有了深反应离子刻蚀（DRIE）、LIGA 和准分子激光等多种工艺创新。这些工艺相互补充，各有所长。目前已经面市的一代 MEMS 产品具有的关键特征：简单、易于大规模生产、价格便宜、适合用硅平面工艺加工。硅熔合键合与深反应离子刻蚀相结合是把“表面”微机械加工与传统的“体”微机械加工的优点结合起来，即把一般集成电路制造工艺的设计灵活性与兼容性和体工艺的坚固性和三维成形能力结合起来。

深反应离子刻蚀采用以氯和氟为基础的等离子体（如用射频功率驱动）刻蚀出近似垂直壁面的深层结构。目前已经能刻蚀出 200μm 的深度。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

4）测试技术

MEMS 的封装和测试占重要地位。建立在微电子基础上的 MEMS 产品的生产工艺应该是比较成熟和可靠的，伴随着 CAD 和生产工艺要求的不断提高，提高测试和封装的水平才能确保产品的高性能、高可靠性并降低生产成本。

3. MEMS 技术分类

1）传感 MEMS 技术

在 MEMS 技术研究领域中，传感 MEMS 是指采用微电子和微机械加工技术制造出来的、特征尺寸至微米/纳米级、具有将感受量转换为电信号的器件和系统，包括速度、加速度、压力、温度、湿度、气体、磁、光、声、生物、化学等传感 MEMS，它是人类探知自然界的触角，是各种现代化装置中的神经元。

现代信息技术是 21 世纪人类社会发展的重要资源和动力，作为信息采集技术的传感器技术、作为信息传输技术的通信技术、作为信息处理技术的微处理器技术已成为现代信息技术的三大支柱。作为现代高新技术的传感器 MEMS 技术是现代传感器技术的重要发展方向。20 世纪 80 年代后期 MEMS 技术的飞速发展，极大地推动了微传感器技术和微执行器技术的发展。采用 MEMS 技术制作的微传感器由于体积小、重量轻、成本低、功耗低、具有高可靠性、易于批量化生产、易于集成化和多功能化，成为各种包含自动化装置的现代武器装备必不可少的关键技术，其应用领域十分广泛。

2）生物 MEMS 技术

生物 MEMS 技术是一类应用 MEMS 加工技术制造的化学/生物微型分析和检测芯片或仪器。它把生化检测过程中的进样、反应、分析、检测等功能通过固相基片上的微反应器（微流体腔和微流体管道）实现。借助 MEMS 加工技术制备的微阵列芯片是生物 MEMS 研究的重要方面，药物缓释芯片以及其他与生物医学诊断和治疗相关的芯片式微型装置和仪器也是生物 MEMS 的研究内容。

生物 MEMS 是一种典型的 MEMS 器件及系统，具有体积小、成本低、可标准化和批量化生产等特点。在功能上它具有获取信息量大、分析效率高、样品用量少、操作简便、可实现生物和化学信息的实时自动化检测等特点，在生物医学、化工、制药、农业、环境监测、国家安全等许多研究和应用领域有重要的应用。

3）信息 MEMS 技术

现代信息技术的基础和核心是微电子技术，从微电子技术二维加工到 MEMS 技术，又对信息技术的新发展产生了重大作用。人们可以在一个芯片或微型系统上将信息获取、信息传输、处理和执行等功能集成起来。这类用于通信、多媒体、网络和智能等领域中的 MEMS 技术称为信息 MEMS 技术。信息 MEMS 技术中已形成产业的有硬盘读写头、喷墨打印头、数字微镜阵列（DMD）等。目前的研究热点是全光通信和移动通信中的 MEMS 技术，如 MEMS 光开关和 RF MEMS 开关等。

信息 MEMS 技术在信息领域中的应用会促进许多产品的集成化、微型化、智能化，成倍地提高器件和系统的功能密度、信息密度和互联密度，大幅度地节能，具有广阔的应用前景，对通信、交通、国防和家庭将带来革命性影响。

总之，MEMS 已显示出强大的生命力，甚至单个种类的 MEMS 器件已形成了一个较大规

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

模的产业，如硅微加速度计、喷墨打印头、硅微压力传感器等。MEMS 技术的发展目标在于，通过微型化、集成化来探索新原理、新功能的元件和系统，为机电产品开辟一个全新技术领域和产业。MEMS 可以完成大尺寸机电系统所不能完成的任务，也可嵌入大尺寸系统中，把机电系统的自动化、智能化和可靠性提高到一个新的水平。21 世纪 MEMS 将逐步从实验室走向实用化，对工农业、信息、环境、航空、航天、生物工程、医疗、空间技术、国防和科学发展产生重大影响，人类的生产和生活方式也会因此而发生某些改变。

思考与练习

1．简述物联网中间件的作用及分类。
2．分析描述型数据挖掘和预测型数据挖掘的区别及特点。
3．讨论 MEMS 的技术分类。
4．讨论物联网对嵌入式技术的影响。
5．分析 Google 云计算平台的主要技术。

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

第7章

物联网安全

【学习要求】

（1）了解物联网常用的身份识别技术，掌握物联网中的密钥管理技术、密钥管理系统和密钥产生技术。

（2）掌握物联网安全体系结构。

（3）了解物联网与 RFID 存在的安全问题。

物联网是一门新技术，在其概念、内涵和外延尚没有统一标准的情况下，各地已争相建立物联网基础设施和区域性的物联网示范工程。诚然，这在一定程度上促进了物联网的研究与发展，但是不可避免地也产生了不少的安全隐患。物联网的应用遍及生活中的方方面面，物联网的安全与隐私问题将直接影响人们的生命财产安全。因此，物联网的安全和隐私问题是关系到物联网产业能否可持续发展的决定性要素之一。本章主要讨论物联网无线传输面临的一系列安全问题。

7.1 物联网安全概述

由于物联网中的终端设备大多处于无人值守的环境中，并且终端节点数量巨大，感知节点具有组群化、低移动性等特点，物联网应用对运营商的通信网络提出了更高的要求。由于物联网具有区别于传统通信网络的不同特点，物联网不仅面临现有的移动网络中所具有的网络威胁，还面临与其网络特点相关的特殊安全威胁。

物联网应用系统中的数据大多是一些应用场景中的实时数据，其中不乏国家重要行业的敏感数据，物联网应用系统的安全保证是物联网健康发展的重要保障。信息与网络安全的目标是要保证被保护信息的机密性、完整性和可用性。这个要求贯穿了物联网的感知信息采集、汇聚、融合、传输、决策等信息处理的全过程，所面临的安全问题有着不同于现有网络系统的特征。

首先，在感知数据采集、传输与信息安全方面，感知节点通常结构简单、资源受限，无法支持复杂的安全功能；感知节点及感知网络种类繁多，采用的通信技术多样，相关的标准规范不完善，尚未建立统一的安全体系。

其次，在物联网业务的安全方面，许多物联网相关的业务支撑平台对于安全的策略导向都是不同的，不同规模范围、不同平台类型、不同业务分类给物联网相关业务层面的安全带来全新的挑战。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

最后，我们还需要从机密性、完整性和可用性角度去分别考虑物联网中信息交互的安全问题。在数据处理过程中同样也存在隐私保护问题，要建立访问控制机制，控制物联网中信息采集、传输和查询等操作。

总之，物联网的安全特征体现了感知信息的多样性、网络环境的复杂性和应用需求的多样性，给安全研究提出了新的更大的挑战。物联网的以数据为中心的特点和应用密切相关性，决定了物联网总体安全目标包括以下几个方面。

保密性：避免非法用户读取机密数据，一个感知网络不应泄露机密数据到相邻网络。

数据鉴别：避免物联网节点被恶意注入虚假信息，确保信息来源于正确的节点。

设备鉴权：避免非法设备接入物联网。

完整性：通过校验来检测数据是否被修改。数据完整性是确保消息被非法（未经认证的）改变后仍能够被识别。

可用性：确保感知网络的信息和服务在任何时间都可以提供给合法用户。

新鲜性：保证接收数据的时效性，确保没有恶意节点重放的消息。

7.1.1 物联网的安全技术分析

物联网在移动网络基础上集成了感知网络和应用平台，移动网络中的大部分安全机制和协议可以为物联网的安全提供一定的保障，例如认证机制和加密机制等。由于物联网又不完全等同于移动网络，所以其安全策略又具有自身的特点。

1. 物联网中的认证机制

传统网络中的认证区分不同层次，例如网络层的认证负责网络层的身份鉴别，应用层的认证负责业务层的身份鉴别，但物联网与应用相关，其感知节点都有专门的用途，其应用与网络层紧密关联，所以对物联网中网络层的认证是必不可少的，但对应用层的认证机制则不是必需的，而是可以根据业务由谁来提供和业务的安全敏感程度来设计。

例如，当物联网的业务由运营商提供时，就可以充分利用网络层认证的结果而不需要进行业务层的认证；当物联网的业务由第三方提供，无法从网络运营商处获得密钥等安全参数时，它就可以发起独立的业务认证而不用考虑网络层的认证；当业务是金融类等敏感业务时，一般业务提供者不会信任网络层的安全级别，而使用更高级别的安全保护，这时就需要做业务层的认证；当业务是气温采集等普通业务时，业务提供者认为网络认证就够了，不需要业务层的认证。

2. 物联网中的加密机制

从网络传输的角度看，传统的网络通常有两种加密策略，即链路加密与端到端加密。信息在网络层传输时经常采用的是链路加密，即每条链路上的加密是独立实现的，通常对每条链路使用不同的加密密钥。信息在传输过程中是加密的，但需要不断地在每个经过的节点上解密和加密，也就是说在每个节点上是明文。信息在应用层传输的时候一般采用端到端加密，信息只在发送端和接收端是明文，在中间节点上是密文。而物联网中的信息在网络层传输和具体应用紧密相关，加密策略究竟应该采用链路加密还是端到端加密要依据具体情况而定。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

若采用链路加密，则可以保证信息在传输链路上的安全，可以在网络层进行，适用于所有应用，也就是说不同的应用可以在统一的物联网应用平台上实施安全管理，从而做到安全机制对用户是透明的。链路加密的好处是低时延、高效率、低成本、可扩展性好。不过，链路加密需要在节点处对数据进行解密，所以信息在节点处是以明文方式呈现的，这就要求传输路径中各节点必须具有很高的可信度。

端对端的加密方式可以根据不同类型的应用选择不同的安全策略，从而为高安全要求的应用提供高安全等级的保护。在实施端到端加密时，每个信息所经过的节点都必须知道目的节点的地址，因此不能对目的地址进行保护，这就导致端到端加密方式中源节点和目的节点是无法隐藏的，容易受到对通信业务进行分析而发起的恶意攻击。

综上所述，对于安全要求不是很高的物联网应用，可以在网络层利用链路加密技术保证其安全；而对于安全要求较高的物联网应用，则需要在应用层实现端到端的加密技术来保证其安全。

7.1.2 物联网面临的安全隐患

随着物联网在各行各业的应用，其安全隐患日渐突出，主要表现在如下几方面。

1. 计算机病毒和恶意入侵

互联网中可能存在的安全隐患在物联网中也有，例如计算机病毒对网络的攻击、黑客入侵、非法授权访问等都会对物联网造成损害，若物联网与互联网相连，则在互联网中传播的病毒、黑客、恶意软件可以绕过相关安全技术的防范，对物联网的授权管理进行恶意操作，掌握和控制他人的物品，进而对用户隐私权造成侵犯，甚至他人的银行卡、信用卡、身份证等敏感物品可能被别有用心的人掌控，从而造成他人财产的损失。

2. 节点数据泄露

物联网中部署了大量的传感器节点或 RFID 节点，这些节点很容易成为被攻击的目标，黑客可以盗取或截获节点中的数据，从而导致节点数据泄露，甚至可以破解节点中的密文导出密钥，从而对系统进行非法授权。例如，攻击者可以直接破解 FRID 标签，这样不但可以获取节点中的数据，还能分析标签的结构设计，为攻击这一类 RFID 标签打开缺口，这样会对整个物联网系统造成严重的安全隐患。就算有些 RFID 节点加密系统设计得很完善，攻击者不能破解其数据，但可以利用读卡器和附有 RFID 标签的智能卡设备对标签进行复制。

3. 链路数据泄露

信息在物联网中采用无线传输，这就给攻击者侦听链路上的数据带来了便利。攻击者可以发射干扰信号堵塞正常的通信链路，使得正常的业务被拒绝服务；也可以利用潜伏的节点向基站或读写器发送数据，这样基站或读写器处理的数据都是虚假的，达到破坏物联网正常工作的目的。

4. 读写器接口的安全隐患

在基于 RFID 的物联网中，读写器是不可以缺少的设备，目前市场上的读写器有手持式

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子标签读写器、基站式读写器、第二代身份证读写器、动物标识读写器等多种类型，这些读写器除有的中间件被用来完成数据的遴选、时间过滤和管理外，多数只能提供用户业务接口，没有给用户留下提升安全性能的接口，这就使得读写器安全问题成为物联网安全的隐患之一。

5. 个人隐私泄露

在物联网技术应用中，携带有 RFID 标签或带有物联网传感器节点的人或物很容易被自动跟踪，节点中的信息很容易与一个人的身份一一对应，这样就可以通过监控节点的行踪而获得一个人的行为轨迹。还可以通过节点或标签对用户实现关联威胁，例如，在用户购买一个携带 EPC 标签的物品时，可以将用户的身份与该物品的电子序列号相关联，这类关联可能是秘密的，甚至是无意的，或仅仅是为售后服务而进行的，这些信息很容易被泄露或出售，这就给用户带了相应的关联威胁。

总之，物联网中用户的位置隐私和信息隐私都可能被暴露。

7.1.3 物联网安全的内容

1. 机密性

对存储在物联网节点中的信息进行加密，使得在物联网中传输的信息具有机密性，这是物联网安全的重要内容。机密性虽然不是物联网安全的全部内容，但没有机密性的物联网肯定没有安全可言，机密性是物联网其他安全机制的基础。

2. 安全协议的设计

目前在安全协议设计方面，主要是针对具体的攻击设计安全的通信协议，通信协议的设计与 RFID、传感器网络及移动通信技术相关。设计出来的协议可以通过形式化证明的方法或人工分析的方法来讨论其安全性。

3. 访问控制

对接入网络用户权限加以控制称为访问控制，物联网中必须规定并控制用户的存取权限，由于网络是个复杂的系统，物联网中的访问控制权限虽然建立在计算机操作系统的访问控制机制之上，但比操作系统的访问控制机制更复杂，特别是在多级安全的高级别安全问题上表现得尤为突出。

加解密技术渗透在物联网的机密性、安全协议的设计及访问控制中，机密性可以通过加密技术来实现，加密算法的强度是安全协议设计的一个标准，对用户、权限及口令的加密也采用访问控制的手段。下面介绍常用的两类密码体制。

7.1.4 两类密码体制

通信系统中，典型的数据加密模型如图 7-1 所示，发送方向接收方发送的明文经过加密运算得到密文，密文通过公共网络到达接收方后经过解密运算得到明文。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

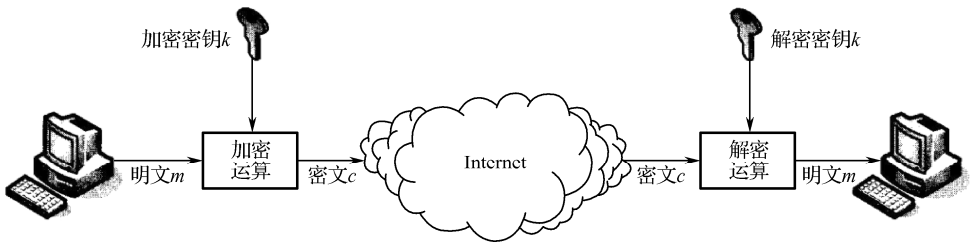


图 7-1 典型的数据加密模型

数据加密模型由 5 元组构成，5 元组是{明文，密文，密钥，加密算法，解密算法}。其中：

明文是发送方要发送的原始信息，通常用 m 或 p 表示，所有可能的明文构成一个集合，称为明文集，用 M 或 P 表示。

密文是明文经过加密变换后得到的结果，通常用 c 表示，所有可能的密文构成一个集合，称为密文集，用 C 表示。

密钥是参与密码变换的参数，通常用 k 表示，所有可能的密钥构成一个集合，称为密钥集。

加密算法是将明文变换为密文的函数，相应的变换过程称为加密运算，通常用 E 表示，明文在加密密钥的作用下通过加密变换得到密文，表示为 $c=E_k(m)$。

解密算法是将密文变换为明文的函数，相应的变换过程称为解密运算，通常用 D 表示，密文在解密密钥的作用下通过解密变换得到明文，表示为 $m=D_k(c)$。

在加密模型中，根据密钥的不同，可以分为对称密码体制和非对称密码体制两大类，下面分别介绍。

1. 对称密码体制

加密密钥和解密密钥相同的密码体制就是对称密码体制。图 7-2 是对称密码模型。典型的对称密码体制有数据加密标准 DES，它由 IBM 公司研制，于 1977 年被美国定为联邦信息标准后，在国际上引起了极大的重视，ISO 曾将 DES 作为数据加密标准。

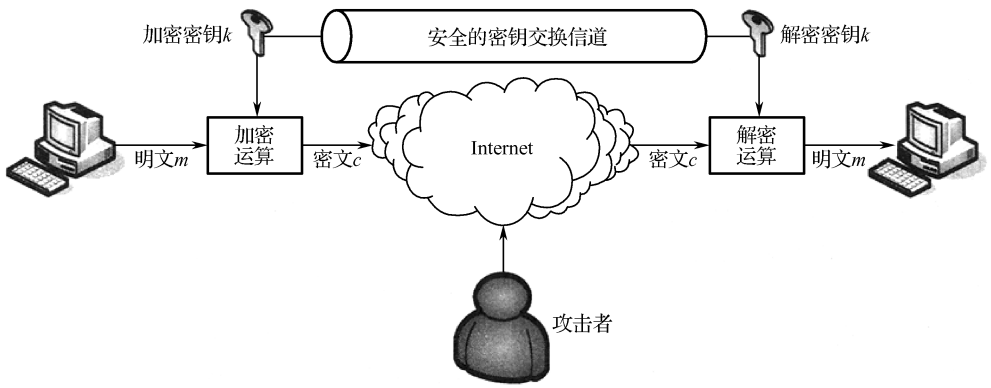


图 7-2 对称密码模型

DES 是一种分组密码，其密钥长度为 64 位，实际密钥长度为 56 位，另外 8 位用于奇偶校验。在加密前先将整个明文进行分组，每一个分组为长度是 64 位的二进制数据。然后对每

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

个分组进行加密，产生一组 64 位的密文数据。最后将各个密文分组串接起来，就得到了整个密文。DES 的解密过程和加密类似，解密时使用与加密同样的算法和密钥，只是子密钥的使用次序要反过来。

DES 在物联网安全中应用非常广泛，DES 算法在 POS、ATM、智能卡（IC 卡）、加油站、高速公路收费站等领域均有应用，用来保护这些系统中的关键敏感数据，如信用卡持卡人 PIN 加密传输、IC 卡与 POS 间的双向认证、金融交易数据包的 MAC 校验等均用到 DES 算法。另外，DES 在 RFID 中的应用也越来越多。

2. 非对称密码体制

对称密码体制中存在密钥分配问题和数字签名的问题，这就促使了非对称密码体制的产生，非对称密码体制又叫公钥密码体制或双密钥体制，其加密密钥和解密密钥不同。图 7-3 是非对称密码体制模型。

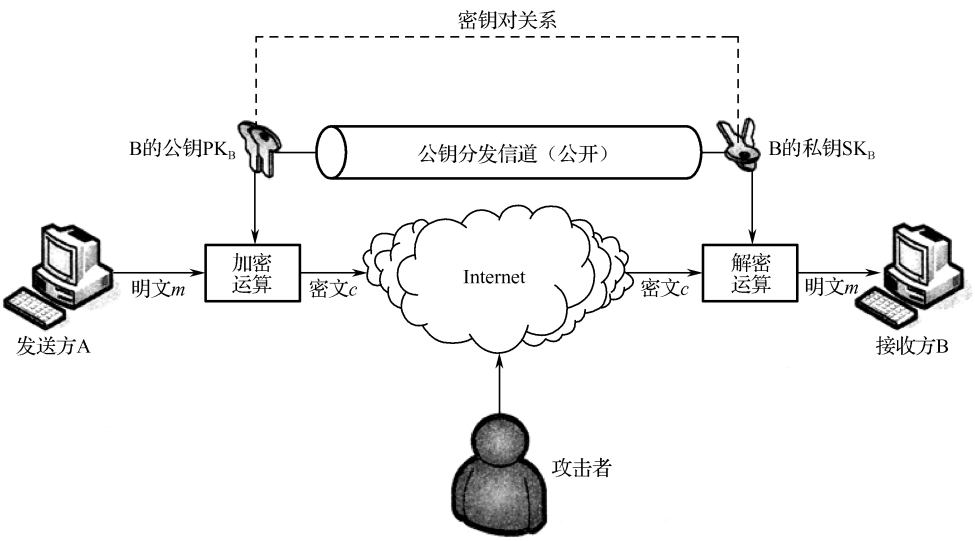


图 7-3　非对称密码体制模型

在非对称密码体制中存在一对密钥，分别称为公钥（Public Key，PK）和私钥（Secret Key，SK）。其中，公钥是公开的，可以通过公开渠道来分发，用来加密；私钥是与公钥配对的密钥，用来解密。例如图 7-3 中，发送方 A 用接收方 B 的公钥加密明文，得到密文，密文通过不安全的公开信道传输到接收方 B，接收方 B 用自己的私钥解密密文得到对应的明文。也就是说，网络中需要保密通信的每个端系统都产生一对用于加密和解密的密钥，每个系统都可以基于点对点、密钥分发中心或公钥证书等形式来分发公钥，私钥则由密钥拥有者自己保管。假设发送方 A 想给接收方 B 发送报文，接收方 B 容易通过计算产生一对密钥 PK_B 和 SK_B，发送方 A 在知道 B 的公钥和待加密报文 m 的情况下，很容易通过计算产生对应的密文 $c=E_{PKB}(m)$，接收方 B 使用自己的私钥容易通过计算解密所得的密文，从而得到明文 $m=D_{SKB}(c)=D_{SKB}(E_{PKB}(m))$。攻击者即使知道公钥 PK，要根据公钥推出私钥 SK 在计算上是不可行的；攻击者即使知道公钥 PK 和密文 c，要想恢复成原来的报文 m 在计算上也是不可行的。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

典型的非对称密码体制有 RSA 和 ECC。RSA 是由美国麻省理工学院的 Rivest、Shamir 和 Adleman 在 1978 年提出来的。RSA 是唯一被广泛接受并实现的通用公开密钥密码算法，目前已成为公钥密码的国际标准，该算法的数学基础是初等数论中的欧拉定理，其安全性建立在大整数因子分解的困难性上。基于 RSA 的公钥密码体制得到了广泛的应用，但其在加密和解密过程中计算速度缓慢，并且随着计算机处理能力的提高和计算机网络技术的发展，安全使用 RSA 要求密钥长度增加，这就使得使用 RSA 的应用系统需要更多时间用来计算，这对于进行大量安全交易的电子商务网站来说显得更为不利。物联网中节点具有有限的计算能力和存储空间，这使得 RSA 在物联网安全方面的应用受到限制。

椭圆曲线密码体制（Elliptic Curve Cryptography，ECC）是 Neal Koblitz 和 Victor Miller 在 1985 年分别提出并在近年开始得到重视的，其安全性基于椭圆曲线离散对数问题的难解性。ECC 没有亚指数攻击，它的密钥长度大大减少，256 比特的 ECC 密钥就可以达到对称密码体制 128 比特密钥的安全水平，这使得 ECC 成为目前已知公钥密码体制中每位提供加密强度最高的一种体制。达到与 RSA 相同的安全强度，ECC 需要的密钥比特比 RSA 少得多，这样就减少了存储开销、提高了计算效率并节约了通信带宽。这样的特性使得 ECC 在物联网安全方面得到了广泛的应用，例如传感器节点的加密、智能卡的加密、手机的加密及 RFID 节点的加密等，都使用了 ECC。

7.2 物联网安全体系

在物联网发展的高级阶段，由于物联网场景中的实体均具有一定的感知、计算和执行能力，广泛存在的这些感知设备将会对国家基础、社会和个人信息安全构成新的威胁。一方面，由于物联网具有网络技术种类的兼容性和业务范围无限扩展的特点，因此当大到国家电网数据、小到个人病例情况都接到物联网上时，将可能导致更多的公众信息在任何时候、任何地方被非法获取；另一方面，随着国家重要的基础行业都依赖于物联网，国家基础领域的动态信息有可能被窃取。所有这些问题使得物联网安全上升到国家层面，需要从感知安全、网络安全、应用安全和安全管理几个方面提出物联网安全的体系结构。

7.2.1 物联网的安全层次模型

按照当前国内外通用的物联网架构，将物联网分成感知层、网络层和应用层三部分。为构建整个物联网安全架构，需要分别考虑感知层安全问题、网络层安全问题和应用层不同业务中的安全问题。

从物联网的架构出发，物联网安全的总体需求就是信息采集安全、信息传输安全、信息处理安全和信息利用安全的综合，最终目标是确保信息的保密性、完整性、真实性和网络的容错性，物联网的安全层次模型如图 7-4 所示。物联网有三个重要特征。第一，全面感知，利用 RFID、传感器、二维码等随时随地获得传感节点所感知的事物的信息。第二，可靠传递，利用互联网、电信网、广播电视网等，将获取到的实时信息按时准确地发送出去。第三，智能处理，采用模糊识别技术、云计算技术等各种智能处理手段，对接收到的海量的信息和数据进行识别和处理，从而实现对物体的实时智能控制。物联网安全需要对物联网的各个层次进行有效的安全保障，需要确定相应的安全问题及解决方案，还要对各个层次的安全防护手

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

段进行统一的管理和控制。

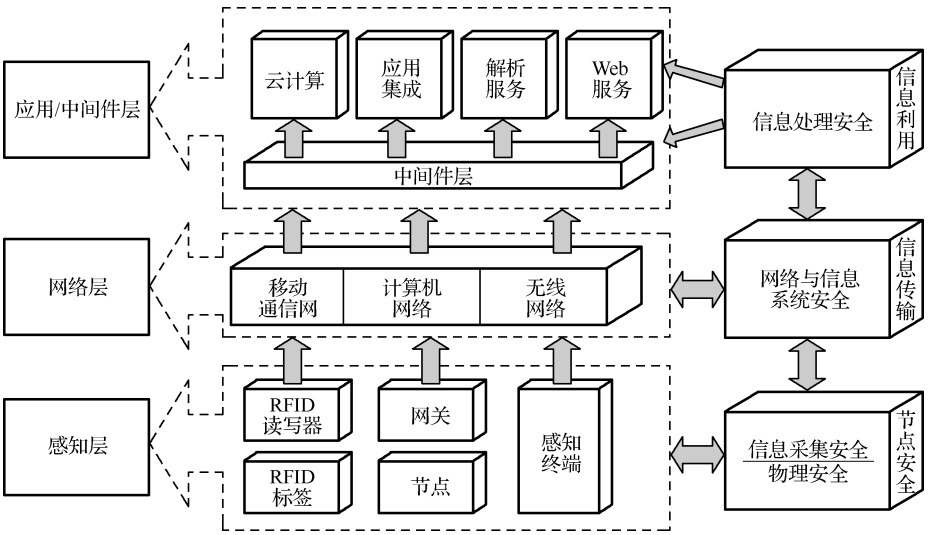


图 7-4　物联网的安全层次模型

物联网安全还存在各种非技术因素。目前，物联网在我国的发展表现为行业性太强，公众性和公用性不足；重数据收集，轻数据挖掘与智能处理；产业链长，但每一环节规模效益不够，商业模式不清晰。物联网是一种新的应用，要想得以快速发展，一定要建立一个社会各方共同参与和协作的组织模式，集中优势资源，这样物联网应用才会朝着规模化、智能化和协同化的方向发展。物联网的安全普及需要各方的协调及各种力量的整合，这就需要国家的政策以及相关立法走在前面，以便引导物联网朝着安全、健康、稳定的方向发展。

物联网安全研究是一个新兴的领域，任何安全技术都伴随着具体的需求而生，因此物联网的安全研究将始终贯穿于人们的生活之中。未来的物联网安全研究将主要集中在开放的物联网安全体系、物联网个体隐私保护模式、物联网终端安全功能、物联网安全相关法律的制定等几个方面，人们的安全意识教育也将是影响物联网安全的一个重要因素。从技术角度来说，需要对物联网的安全尺度和特有安全问题进行分析，提出物联网安全的体系架构，全面解决物联网存在的安全隐患。

7.2.2　物联网感知层安全

感知层就像人的皮肤，包含了无数个神经元，这些神经元就是物联网中大量的传感节点。感知层负责准确无误地收集外界信息，在不同的环境中所收集的信息不尽相同。感知层用于感知的工具有射频识别设备、摄像头等图像捕捉装置、多种多样的传感器、全球定位系统（GPS）、激光扫描仪等。

作为信息感知功能层，感知器件和设施通常功能比较单一，信息处理能力有限，更关键的是感知器件通常远离人们的可及范围，因此感知层的安全特征主要有：感知节点的计算能力和资源有限、感知节点之间需要自组路由网络、布置空间的环境因素不可控、通信带宽和供应能量有限、应用层次差异较大。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

感知层部署节点区域的开放性和无线广播式信息传输网络，造成了无线传感器网络比互联网更易遭受攻击。常见的攻击方式主要有：路由伪造、路由隐藏、黑洞攻击、虫洞攻击、拒绝服务攻击和女巫攻击。

感知层主要涉及识别和感知两种技术，识别主要由条形码、磁卡、RFID 等完成，感知主要由各种传感器组成的无线传感器网络完成。

1. 感知层安全机制的建立

在物联网感知层，需要提供机密性、数据完整性和认证等安全机制，而物联网感知层的感知节点常常受到资源限制，只能执行少量的计算和通信任务。为此，物联网感知层需要轻量级密码算法和轻量级认证技术。

1）轻量级密码算法

目前业内对轻量级算法没有很明确的界定标准。轻量级加密算法有两个维度的定义，一是加密算法本身的安全强度，另一个是加密算法对资源的消耗。当算法强度符合安全需求，且对终端的资源需求不多时，就认为它是轻量级加密算法。

2）轻量级认证技术

认证技术通过基础服务设施的形式将用户身份管理和设备身份管理关联起来，实现物联网中所有接入设备和人员的数字身份管理、授权、责任追踪，以及传输消息的完整性保护，这是整个网络的安全核心和命脉。认证技术分为两类，一类是对消息本身的认证，使用的技术是消息认证码（MAC），其目的是提供消息完整性认证；另一类是认证协议，用于对通信双方身份的确认。

国际标准化组织正在制定轻量级密码算法的相关标准，其中包括轻量级的分组密码、流密码、数字签名等。但是，目前对于轻量级认证技术并没有统一的衡量和评价的标准体系，轻量级认证还处于发展阶段。

2. 传感器网络的安全问题与技术

作为物联网的基础单元，传感器在物联网信息采集层面能否完成它的使命，成为物联网感知任务成败的关键。传感器技术是物联网技术的支撑、应用的支撑和未来泛在网的支撑。传感器网络到物联网的演变是信息技术发展的阶段表征，传感技术利用传感器和多跳自组织网，协作地感知、采集网络覆盖区域中感知对象的信息，并发布给上层。由于传感器网络本身具有无线链路比较脆弱、网络拓扑动态变化、节点计算能力有限、存储能力有限、能源有限、无线通信过程中易受到干扰等特点，使得传统的安全机制无法应用到传感器网络中。目前传感器网络安全技术主要包括如下几种。

1）基本安全框架

安全框架主要有以数据为中心的自适应通信路由协议（SPIN）、Tiny 操作系统保密协议（Tiny Sec）、名址分离网络协议（LISP）、轻型可扩展身份验证协议（LEAP）等。

2）节点认证

节点认证包括节点的单向或双向认证，确保消息的来源和去向正确。

3）消息机密性

保护数据不被非法截获者获知。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

4）消息完整性

保护传输的数据不被非法修改。

5）密钥管理

每个感知节点都采用不同的密钥，传感器网络的密钥管理主要采用随机预分配模型的密钥管理方案。

6）安全路由

安全路由技术常采用的方法有“容侵策略”。

7）入侵检测

入侵检测技术常常作为信息安全的第二道防线，主要包括被动监听检测和主动检测两大类。除上述安全保护技术外，由于物联网节点资源受限，且高密度冗余散布，不可能在每个节点上都运行一个全功能的入侵检测系统（IDS），所以如何在传感器网络中合理地分布 IDS，有待于进一步研究。

3. RFID 的安全问题与技术

现今威胁 RFID 系统安全的攻击手段大致分为两种类型：一种为主动型攻击，另一种为被动型攻击。

主动型攻击：攻击者可以利用物理手段或恶意程序方法对电子标签内部的数据信息进行篡改或删除操作，也可以通过某种机器设备对 RFID 系统信号进行干扰，以此阻碍系统内部的正常通信。

被动型攻击：攻击者不再以篡改通信消息为目的，而是为了获知射频识别系统中无线信道里的信息数据，其中包括用户的个人信息、物品信息等。攻击者只能在读写器与电子标签同时工作的状态下发起被动攻击。

依据以上两种攻击手段，涉及的 RFID 安全问题有如下几种。

1）非法读取查询信息

攻击者使用读写器向电子标签发出信息，通过查看标签的响应获取相关信息。

2）假冒、伪造攻击

攻击者通过截获等手段获取标签的身份信息，然后冒充有效电子标签骗取读写器的验证。

此类攻击手段属于主动型攻击，破坏性极大，为最常用的攻击手段，是 RFID 系统的主要安全隐患之一。

3）复杂攻击

在得到目标电子标签后，运用物理方法将电子标签内置芯片去封装，再利用探针取得敏感信号，最后对标签实施重构。

4）篡改攻击

截获读写器与电子标签的通信信息，然后利用软件或者恶意程序对信息进行恶意处理，再将处理后的信息发给读写器或者电子标签以骗取接收对象的信任。

5）窃听攻击

攻击者事先将一个射频探测器安放在合法电子标签或读写器附近。当读写器或电子标签向对方发送信息时，探测器便会在无线信道上截获该信息，然后攻击者会通过推理演绎或分

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

析统计的方法从该信息中获取自身所需要的部分或全部数据，再利用获取的数据进行其他类型攻击。在实施窃听攻击的过程中，由于射频探测器不需要向外发送任何信号，因此难以检测到系统中是否存在窃听行为。窃听攻击是现在 RFID 系统中最容易实施且易引发其他类型攻击的攻击手段，是多种攻击手段的衍生源泉。现今若不及时有效地处理掉这样的安全隐患，恐怕将阻碍日后 RFID 技术的应用与发展。

6）位置追踪攻击

位置追踪是基于窃听攻击的 RFID 系统威胁。当被锁定的目标 RFID 标签返回固定的通信信息时，攻击者就可以以此不断跟踪该 RFID 标签，如果该标签与人联系，就可能发生隐私信息的泄露。

7）拒绝服务攻击

攻击者可以利用非法读写器数量上的优势向同一标签发送请求消息，导致正常标签无法进行通信或者认证时间过长。同理，攻击者也可以利用大量标签向合法读写器发送认证请求，迫使系统过载，无法进行正常工作。拒绝服务也称 DOS 攻击。

8）去同步化攻击

由于某些协议规定标签与后端数据库在执行完一次认证后都需要进行自身标识或密钥的更新操作，攻击者可以利用这样的条件对系统进行阻断攻击，屏蔽读写器和标签间的回应信号。这样一来，系统中一方数据密钥更新过了而另一方数据密钥未更新，出现了信息不同步的状况，从而导致协议认证无法继续执行，合法标签无法得以认证。

9）重放攻击

当合法的读写器或合法电子标签向对方发出信息时，攻击者窃听该信息并记录保存下来。在新一轮标签与读写器认证的时候，攻击者取出之前记录下的信息假冒成合法读写器或合法标签，再次把该信息返回给接收者以骗取接收者的信任。

10）前向安全性攻击

攻击者通过窃听截获某一时刻的通信信息，并利用得到的信息与之前信息的关联性推理分析出与当前信息相关的历史数据。

RFID 系统的隐私保护方式：

（1）防止合法标签内部的隐私数据信息泄露。

（2）防止不法分子对 RFID 标签实施位置追踪。

针对以上 RFID 安全隐私问题，提出了多种保护策略。这些策略依据不同的实现方式大致可分为两类：一类是采用物理手段的保护机制，另一类是采用密码算法的保护方法。

7.2.3 物联网网络层安全

物联网的网络层主要为城际网和骨干网，通常是指融合了多种类型网络的下一代新型网络。由于物联网的通信设备往往是事先部署且无专人监控的，所以如何对这些设备进行快速自适应的配置，在这些异构互联的网络之上建立可控可管的安全平台成为了难题，主要涉及可信和安全的数据路由。

由于骨干网络的封闭性较强，所以网络层主要存在的安全威胁是路由攻击，如对路径拓扑和转发数据的恶意行为，以及拒绝服务攻击等。由于主要是有线或终端–基站无线传输，所以与感知层的路由攻击方式有所不同。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

7.2.4 物联网应用层安全

在应用层，攻击者可以根据已知的应用漏洞（缓冲区溢出、跨站点脚本和 SQL 注入等）、错误配置（如简单密码）或后门获得较高的权限，破坏应用的机密性。

（1）隐私泄露。物联网应用均宿于常见的操作系统和托管服务之上，如果软件更新不及时，攻击者可根据已知的漏洞非法获得用户的数据（用户密码、历史数据、社交关系）；或根据查询结果，分析终端的位置和身份隐私。

（2）拒绝服务攻击。与中间件层类似，攻击者可破坏应用的可用性。

（3）恶意代码。通过已知漏洞，攻击者可上传恶意代码，造成访问用户的软件被感染。

（4）社会工程。物联网用户间存在一定的关系，攻击者可能通过社会工程分析或获得额外的信息，进而进行其他攻击。

物联网的应用层威胁与互联网类似，但物联网应用的社交性、地域局部性使其更难防范攻击。

7.3 物联网与传感器的安全技术

7.3.1 无线传感器网络的安全需求

传感器网络安全服务的目标就是防止信息和网络资源受到攻击和发生异常。传感器网络应满足以下安全需求。

1. 数据机密性

数据机密性是网络安全中最重要的内容，每个网络都要首先解决数据机密性问题。一个传感器网络不应该将其传感器感知的数据泄露到邻近网络，特别是在军事应用中，传感器节点存储的数据可能高度敏感。在很多传感器网络应用中（如密钥分发），节点需要发送高度敏感数据，因此建立安全信道尤其重要。公用传感器信息（如传感器节点身份识别码、公共密钥等）也应该被加密，这能在一定程度上防止流量分析攻击。

保持敏感数据机密性的标准方法是采用密钥加密敏感数据，只有预先确定的接收节点才有密钥。对于给定通信模式，必须建立节点与中心节点之间的安全信道以及必要的其他安全信道。

2. 数据完整性

通常攻击者没有办法窃取已经实现了数据加密的信息，但是这也不是说数据就已经十分安全了。攻击者能够修改数据，然后将改变后的分组发送给原始接收节点。即使不存在恶意节点，由于通信环境条件恶劣，仍然会发生数据丢失或者数据受损的情况。数据完整性的作用主要是保证传输的数据没有被攻击者攻击而实施改变，保证可以接收到完整的数据信息。一般采用数据认证来实现数据完整性。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

3. 认证

消息认证对很多传感器网络应用都非常重要。攻击者并不局限于修改数据分组，还能够通过注入额外分组而改变整个分组流，所以接收节点必须确保决策过程中使用的数据来自正确的可信任源节点。接收节点通过数据认证来验证数据是不是所要求的发送节点发送的。

对于点对点通信，可以采用完全对称机制实现数据认证。发送节点和接收节点共享一个密钥，密钥用于计算所有通信数据的消息认证码（Message Authentication Code，MAC）。接收节点收到一条具有正确消息认证码的消息时，就知道这条消息必定是与其通信的那个合法发送节点发送的。

在广播环境中不能对网络节点做出较高的信任假设，因此这种认证技术不适用于广播环境。假如一个发送节点需要给不信任的接收节点发送消息，那么使用一个对称消息认证码是不安全的，任何一个不信任接收节点只要知道这个对称消息认证码，就可以假扮成这个发送节点，伪造发送给其他接收节点的消息。因此，需要用非对称机制来实现广播认证。

4. 数据新鲜度

即使能够保证数据的机密性和完整性，仍然必须确保每条消息的新鲜度。保持数据新鲜度意味着数据是最近的，确保它不是攻击者重放的旧消息。当采用共享密钥策略时，这个要求尤其重要，通常共享密钥必须随时改变。但是，将新的共享密钥传播给整个网络需要一定时间。在这种情况下，攻击者很容易进行重放攻击。通常的解决办法是用随机数或者与时间关联度较高的一个计数器来保证数据的新鲜度。

SPIN 识别两种类型的新鲜度：弱新鲜度——提供局部消息排序，但是不承载时延信息；强新鲜度——提供全部请求响应对的排序，允许时延估计。弱新鲜度用于传感器感知数据，强新鲜度用于网内时间同步。

5. 自组织

传感器网络通常是自组织网络，传感器网络中的不同传感器节点具有很好的拓扑结构，能够按照需求进行不同方式的组合或者排列，同时具有较好的灵活性，并能够独立完成自组织。网络中不存在固定基础设施用于网络管理。这给传感器网络安全带来极大的挑战。例如，整个网络的动态性导致无法预先配置中心节点与所有传感器节点共享的密钥，于是人们提出了若干种随机密钥预分配方案。若在传感器网络中采用公共密钥加密技术，则必须具有公共密钥高效分发机制。分布式传感器网络必须能够自组织，支持多跳路由和密钥管理，建立传感器节点之间的信任。假如传感器网络自组织能力不足或者缺乏自组织能力，那么攻击者或危险环境造成的网络受损都可能是毁灭性的。

6. 可用性

调整、修改传统加密算法而使其适用于传感器网络很不方便，而且会引入额外开销。此外，修改代码使其尽可能重复使用，采用额外通信实现相同目标，强行限制数据访问，这些方法都会降低传感器和传感器网络的可用性。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

假如使用中心控制方案，那么会发生单点失效问题，极大地威胁网络可用性。

7.3.2 无线传感器网络面临的安全挑战

目前在传感器网络中，传感器节点由于受到能量和功能限制，其所具有的安全机制较少，安全保护功能较弱，并且由于传感器网络目前尚未完全实现标准化，所以导致其中的消息和数据传输的协议也没有统一的标准，从而导致不能给出完善的能够确保安全的保护体系架构。因此，传感器网络除可能遭受同现有网络相同的安全威胁外，还可能受到一些特有的威胁。

（1）对节点身份的攻击威胁：由于目前核心网尚无法对感知网络进行直接控制，因此可能导致攻击者在感知网络范围内部署恶意节点加入合法的感知网络，从而导致网络中的消息泄露，以及攻击者利用恶意节点作为跳板对网络发起新的攻击。

（2）数据传输威胁：感知网络中的数据通常通过广播、多播等方式发送，并且受限于感知节点的能力，很可能无法对数据进行有效的加密保护，因此在无线环境下，数据的传输很容易受到攻击者的监听和破坏。

在信息传输过程中可能遇到以下威胁。

中断：对于路由协议中的分组问题，尤其是有关路由的路径发现，以及路由消息的及时更新，通常可能遭到恶意节点的干扰而产生中断或者阻塞情况。攻击者通常通过不同的手段对消息进行有选择或者有针对性的过滤控制，同时可以针对路由进行消息的及时更新。如果需要，可能会对路由中的协议进行干扰，从而影响其顺畅运行。

拦截：通常是指对传输的信息的拦截，当然这里的信息是通过路由协议进行传输的，并且拦截后攻击者可能会控制路由使其向其他节点转发信息，导致网络不能正常通信。

篡改：攻击者通过篡改路由协议分组，破坏分组中信息的完整性，建立错误的路由，造成合法节点被排斥在网络之外。

伪造：恶意节点可能会隐藏在无线传感器网络的内部，从而伪造正常的传感器节点进行路由信息的转发，对整个网络中的数据传输造成影响。

（3）数据一致性威胁：由于感知网络中的数据通常是通过广播、多播等方式发送的，导致同一份数据通过不同的路径传输时产生多个副本。此外，由于感知节点的数据处理受到效能的限制，很可能无法对数据进行完整性保护，那么在其中某个副本数据产生错误时，数据接收节点将无法判断数据是否可靠有效。而当数据汇聚节点处理来同一份数据的不同副本时，则无法判断数据的真伪。

（4）主动恶意攻击威胁：由于感知节点功能简单，安全性差，发送方式为广播和多播，且缺乏中心控制点，因此攻击者可以在控制某个感知节点的基础上扩散和传播病毒等恶意代码，在较短的时间内将恶意代码扩散到整个感知网络中。而且，由于缺乏中心控制点的控制管理能力，使得无法有效查找到攻击的发起地点。

7.3.3 无线传感器网络可能受到的攻击和防御

传感器网络面临的安全问题：一是来自无线体系中的信号干扰，如攻击者可以采取频率干扰的方法破坏传感器接收信号，破坏传感器节点与汇聚节点之间的联系；二是来自无线自组织网络本身的脆弱性，如无线自组织网络拓扑结构的快速变化；三是来自传感器本身，如单个传感器能量和处理能力有限，引起能量攻击和剥夺休眠攻击等。下面按照传感器网络协

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

议层次结构分析其攻击与防御方法。

1. 物理层攻击及防御

1）拥塞攻击

在无线网络通信过程中，其开放性往往会造成同一频率或者频率相近的信号之间的相互干扰，从而使得不同传感器节点之间的通信变得十分不顺畅。对于敌手来说，若想让其通信半径覆盖范围内的节点无法工作，就可以在这一频段上持续发送信号以造成干扰。也就是说，当敌手的节点数量增加时，可能会导致网络传输能力的下降，甚至破坏整个网络的传输能力。

通常可以运用跳频或者宽频的方式来预防一般单频点的拥塞攻击。也就是说，当在一个频段上大部分传感器节点都无法进行通信时，可以运用不同的方式将所有节点跳转到其他频段上重新进行通信。如果整个频段也就是全频都受到这种连续不断的拥塞攻击，那么较为实用的方法是进行通信模式的转变。但是这种对整个频段进行的连续不断的拥塞攻击是需要耗费巨大资源的，所以很少有攻击者会选用这种攻击方式。

2）物理破坏

对于传感器网络来说，通常部署的时候可能覆盖很大的区域范围，而这种大范围的部署方式不便于对传感器网络内的节点进行管理和控制。敌手通常可以通过非法手段截获不同功能的传感器节点，只要对传感器节点进行相应的操作就会改变传感器本身的性能，以影响整个网络的顺畅通信。

2. 链路层攻击及防御

1）碰撞攻击

碰撞的定义较容易理解，即在开放的无线网络环境中，如果发现数据包中的数据在通信过程中存在问题，这种问题将在数据链路层导致对数据包进行丢弃操作，就认为这是一个碰撞。对于不同的碰撞可以采用不同的方式进行防御，比如可以用特定的纠错编码方式来抵御仅仅影响到小的数据位的瞬间攻击模式，也可以通过监听或者重新发送的方式选取合适的时段进行数据的传输，以减少碰撞发生的可能性。

2）能量耗尽攻击

能量耗尽攻击主要是通过非法手段来消耗节点的能量，如通过分析节点通信协议中容易攻击的漏洞来保持和节点的不间断的通信以耗尽节点的能量。通常解决这一问题的方式是通过改变网络拓扑结构来放弃与这些节点的通信，不过这种方式可能会影响网络传输的效率；还可以自定义一些规则来对一些重传次数偏高的节点进行排斥或者采取某些限制手段。

3. 网络层攻击及防御

1）选择转发攻击

传感器网络利用无线多跳的方式进行通信，其中每一个传感器节点既是终端节点，又是路由中继节点，因此要求传感器节点在接收数据包时无条件进行转发。通常，当数据在敌手部署的恶意节点上进行传输时，该节点可能根据自己设置的规则选择转发或者放弃转发消息，以扰乱整个网络中的数据传输。那么，为了降低网络通信过程中的损失，也可以选择多路径

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

路由的方式进行缓解。

2）Sybil 攻击

Sybil 攻击主要是攻击者伪造多个身份，以降低存储及其他不同容错机制的能效，需要指出的是该攻击对位置追踪也有较大的影响。现阶段可以通过对现有资源进行检测或者基于密码学的方式来预防 Sybil 攻击。

4. 传输层攻击及防御

1）泛洪攻击

泛洪攻击主要是通过泛洪的方式向网络中传输数据量较大的攻击报文，这种方式会影响网络的性能，导致网络不能顺畅地通信。通常可以通过设置安全机制的方式，让用户通过回答不同问题来进行连接，但对于本身就资源有限的节点来说，这种方式无疑会增加计算量并消耗一定的能量。也可以通过入侵检测等方式来限制这种报文的传输。

2）同步破坏攻击

一般情况下，传感器网络会采取类似于同步通信的方式进行传输，而攻击者可以通过非法手段来要求已经建立通信连接的节点重新发送连接请求，从而通过截获这一信息来破坏通信的同步性。可以对通信数据加以鉴别来预防同步破坏攻击。

7.4 物联网与 RFID 安全问题

2008 年 8 月，美国麻省理工学院的三名学生宣布成功破解了波士顿地铁资费卡。更为严重的是，世界各地的公共交通系统都采用几乎同样的智能卡技术。因此，使用他们的破解方法可以“免费搭车游世界”。近几年来，不时爆出这样的破解事件，相关技术人员或者通常意义上的“黑客”声称破解了一种或多种使用 RFID 技术的产品，并可以从中获取用户的隐私，或者伪造 RFID 标签。严峻的安全现状让我们不得不关心，RFID 产品有没有相关的安全和隐私的标准规范呢？这些标准规范又为标签提供了哪些保护？

随着 RFID 技术应用的广泛和深入，个人用户的隐私保护及信息安全已成为 RFID 应用系统需要重视和解决的问题。

7.4.1 RFID 系统的安全需求

RFID 技术近几年在突飞猛进地发展。基于 RFID 本身的一些特性，RFID 系统应满足以下安全需求。

1. 机密性

读写器内的数据只能被授权用户访问。尤其是与标签进行相互认证的密钥，密钥信息一旦泄露，攻击者很可能假冒读写器与标签进行通信，因此必须保证读写器内密钥的机密性。与标签不同的是，读写器不需要严格考虑成本、性能问题，因此可以通过传统的加密机制来保护其机密性。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

2. 完整性

读写器内的数据只能被授权用户修改。尤其要保护与标签相关的信息不被攻击者修改，因为这些信息往往与业务相关。

3. 真实性

要求读写器在安全协议的框架下获得的标签信息是真实的，可以保证该标签是合法的授权标签，获得的信息真实可靠。攻击者可以从截获的标签和读写器之间的通信信息中获取机密数据，从而重构电子标签进行非法操作。

4. 可用性

标签内的数据和功能可以进行正常读取和响应。标签粘贴在物品的表面或嵌在物品里面，粘贴在物品上的标签和标签的芯片很容易被毁坏。此外，EPCglobal 规定标签中的 KILL 命令可以删除标签里部分或者全部数据，使之永久失效。KILL 命令是为了隐私的目的而编写的，攻击者可以利用这一命令毁坏标签，甚至永久毁坏标签。所以要保证标签的可用性，使之能够正常响应读写器的请求。

5. 隐私性

攻击者可以监听携带私密数据的 RFID 电子标签，以获取当前标签用户的隐私数据。安全的 RFID 系统应该能够保障用户的隐私信息不被泄露。

7.4.2 RFID 面临的安全攻击

RFID 系统包括标签、读写器以及标签与读写器之间的射频通信信道。RFID 系统容易遭受各种主动和被动攻击的威胁。RFID 系统本身的安全问题可归纳为隐私和认证两方面：在隐私方面主要是可追踪性问题，即如何防止攻击者对 RFID 标签进行任何形式的跟踪；在认证方面主要是要确保只有合法的读写器才能够与标签进行交互通信。当前，保障 RFID 系统本身安全的方法主要有物理方法（KILL 命令、静电屏蔽、主动干扰以及 Blocker Tag 方法等）及安全协议（哈希锁）。使用 RFID 标签的消费者隐私权备受关注，在使用电子标签进行交易的业务中，标签复制和伪造会给使用者带来损失。在 RFID 标签应用较广的供应链中，如何防止信息的窃听和篡改显得尤为重要。概括地说，RFID 面临的攻击有如下几类。

1. 被动攻击威胁

（1）隐私泄露：RFID 系统最为广泛的应用是查询标签身份，读写器感应到标签时，会向标签进行查询，标签会进行信息反馈，如果未经授权的非法读写器获取标签信息就会导致隐私泄露，其后果极为严重，必须对标签的关键信息加以保护。

（2）跟踪：窃取者可以根据标签传输消息的方式来进行定位，可以时刻跟踪标签的位置来实现跟踪的目的。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2. 主动攻击威胁

与被动攻击不同的是，攻击者并未获得标签相关的有价值的信息，这时可以采用一些主动攻击手段，这些手段如下。

（1）假冒攻击：攻击者可以冒充标签与读写器通信，标签不知情也没有察觉。

（2）重放攻击：攻击者截获标签与读写器的认证数据。然后在两者之间重放之前截获的数据，读写器与标签对以前的数据进行了认证。

（3）去同步化攻击：攻击者阻拦或者修改了读写器与标签通信的部分或者全部数据，两者变得不同步，有很多时候为了防止重放攻击每次密文发送不同，就容易受到去同步化攻击。例如，读写器更新了密钥，但是标签未更新，结果认证失败。

（4）前向与后向安全性攻击：攻击者通过窃听截获某一时刻的通信信息，并利用得到的信息与之前信息的关联性推理分析出与当前信息相关的历史数据。

3. 复合型攻击威胁

（1）标签的所有权变更：这意味着标签的所有者发生了改变。

新用户的安全需求：所有权变更后，只有新的读写器可以对标签进行存取操作，旧用户将丧失这一权利。

旧用户的安全需求：所有权变更后，新用户对旧用户以前对标签的管理一无所知。

（2）中间人攻击：攻击者站在标签与读写器中间，同时对标签和读写器进行攻击，这类攻击具有非常强的欺骗性。例如，攻击者拦截读写器对标签发送的信息，将其直接或者篡改后发给标签，标签接到信息后，误以为是读写器发送的，随即做出响应，攻击者拦截标签信息，再进行转发或者篡改。

4. 破坏性安全威胁

（1）RFID 病毒：由于标签存储区域有限，很长时间内人们认为标签不会遭遇病毒攻击，但是标签一旦遭遇病毒攻击，因其自身存储空间有限，自己是不会察觉的。

（2）物理攻击：攻击者对标签进行干扰或者屏蔽来损害标签的性能，使用电子设备阻碍标签与读写器正常通信，屏蔽读写器与标签之间的通信信道。

（3）拒绝服务攻击：攻击者对读写器施加大量重放攻击，这有可能导致信道阻塞，造成拒绝服务攻击。

7.4.3 RFID 安全机制

RFID 系统面临多种多样的威胁，因此必须采取一定的防护措施加以防范。根据安全机制的执行手段可分为物理方法与软件方法。

1. 物理方法

早期的 RFID 标签存储量更小，几乎没有运算能力，这时人们主要采取的是物理防护措施。物理防护措施是从 RFID 的物理特性角度出发的。

（1）KILL 策略：读写器向标签发送 KILL 命令之后标签将变为无效标签，进而可以不被

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

跟踪，使信息不被泄露。比如在超市购物之后，将标签作废。

（2）法拉第网罩法：所依据的理论是电磁波屏蔽原理，即使用金属丝（箔片）做成的容器存放电子标签来屏蔽信号。这种方法可以有效地保障标签的隐私安全，但并不是所有标签都需要法拉第网罩，比如书、食物等。这种方法能够起到保障标签隐私安全的作用，但自身有一定的局限性，无法适用于所有标签，而且使用这种方法还会额外增加系统成本，给用户的使用带来不便。

（3）人为干扰：在这种情况下，人为主动广播噪声信号对标签进行干扰，这样攻击者的非法读写器就无法读取到标签的响应。

（4）锁定标签：合法读写器可以向标签发送 LOCK 命令，这样一来标签就会被锁定，无法读取写入信息。

综上所述，物理机制是在 RFID 技术发展早期，标签计算、存储能力基本没有时采取的安全措施。现在的 RFID 标签具备一定的计算、存储能力，可以使用软件密码机制对其进行访问控制，而不必像物理机制那样，在保护标签不被攻击者入侵的同时，连合法读写器都无法正常读取。

2. 软件方法

软件安全机制以密码系统为基础，其稳定性、灵活性都高于物理安全机制。在软件安全机制中，只能选择对称密码机制或者轻量级的非对称密码机制，RFID 标签可以增加一些计算模块来达到更高的安全性，例如 RFID 标签内部最好有一个随机数发生器，这样可以做到防跟踪。目前实现 SHA1、MD5 等加密算法需要复杂的逻辑，占用资源多，可用于高成本标签，而计算量更大的公钥密码算法就难以实现了。

3. 基于密码协议的安全分析

上述方法并不能从根本上解决 RFID 系统安全问题。例如，上述方法都使得标签成本太高或者占用资源太多，不能充分利用，而且无法保证安全认证过程。接下来介绍几种安全认证协议。

1）哈希锁

哈希锁（Hash Lock）是一个抵制标签未授权访问的隐私增强协议，2003 年由麻省理工学院和 Auto-ID Center 提出。整个协议只需要采用单向密码学哈希函数实现简单的访问控制，因此可以保证较低的标签成本。在哈希锁协议中，标签不使用真实 ID，而是使用一个 metaID 来代替。通常可以用存储 metaID 的内存以及一个单向 Hash 函数来构成一个完整的标签。使用哈希机制的标签有锁定和非锁定两种状态，在锁定状态下，标签用 metaID 响应所有查询；在非锁定状态下，标签向读写器提供自己的信息。

哈希锁方案为标签提供了初步的访问控制，可以在一定程度上保护标签数据。但是 metaID 不会更新，因此每次标签响应时都使用固定的 metaID。攻击者可以将这个固定的 metaID 当作标签的一个别名，然后通过这个别名来跟踪标签及其携带者。而且，由于 key 通过明文传输，因此很容易被攻击者偷听获取。攻击者因而可以计算或者记录 metaID、key、ID 的组合，并在与合法的标签或者读写器的交互中假冒读写器或者标签，实施欺骗。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2）随机哈希锁

随机哈希锁（Randomized Hash Lock）是哈希锁协议的扩展，在这个协议中，读写器每次访问标签得到的输出信息都不同。在随机哈希锁协议中，标签需要包含一个单向密码学哈希函数和一个伪随机数发生器，读写器也拥有同样的哈希函数和伪随机数发生器，并将对应于每个标签的 ID 存储在后台系统的数据库当中；读写器还在每一个标签中共享一个唯一的密钥 key，这个 key 将作为密码学哈希函数的密钥用于计算。

这个协议不能够防止重放攻击。这是因为在标签返回的消息中只含有标签内的一些信息，而不含有来自读写器的信息，即没有可以唯一确定本次会话的信息。若攻击者偷听一个标签的响应，然后在读写器查询时回放这个响应，就可以伪装为这个标签。另外，每次确认一个标签身份都需要穷尽整个数据库中的所有 ID，并进行哈希运算，整个认证过程耗时多，因此本方法不具有很强的可扩展性，只能适用于小规模的应用。

3）哈希链

该协议中读写器与标签均共享两个单向 Hash 函数——$F()$和 $H()$，$F()$用来计算响应值，$H()$用来计算秘密值。最开始的时候，标签、读写器之间共享一个秘密值 a，每一次认证的时候，标签会发送 $H(a)$，读写器会验证 $H(a)$，标签使用 $F(a)$来对 a 进行更新，读写器将通过遍历数据库来验证 $H(a)$，即计算数据库中为每一个标签所存储的全部秘密值的 $H()$，若查询到对应秘密值，则认证成功，同时更新密钥，否则认证失败。

该协议的秘密值虽然不断更新，但是还没有认证成功标签便已经更新了自己的秘密值 a，那么如果标签遭遇非法攻击，即使认证失败，自身的秘密值 a 也已经改变，下一次，当合法读写器对它发起请求时，读写器上记录的还是标签原来的秘密值 a，这时认证就会失败。也就是说，该协议无法抵挡去同步攻击，该协议在面临一次假冒攻击后，标签与读写器的秘密值将不同步，因而无法认证成功。

思考与练习

1．信息安全的基本属性是什么？

2．信息安全威胁的具体方式和解决手段是什么？

3．密码体制有哪几种？公共密码体制有什么特点？

4．举例说明物联网安全威胁。

5．解释物联网安全层次模型。

6．简述物联网安全与互联网安全的关系。

7．为什么说物联网感知层的安全是物联网安全的重点？物联网感知层的安全机制怎样建立？

8．RFID 面临的攻击有哪几类？

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

第8章

物联网应用

8.1 智能家居

8.1.1 智能家居概念

智能家居是利用先进的综合布线技术、计算机技术、智能云端控制、网络通信技术、医疗电子技术，依照人体工程学原理，融合用户需求，将和居家生活有关的安防安保、灯光控制、窗帘控制、信息家电、地板采暖、煤气阀控制、场景联动、保健、卫生防疫等子系统有机地结合在一起，通过网络化综合智能控制和管理，实现“以人为本”的全新家居生活体验。

与智能家居含义近似的有家庭自动化、电子家庭、数字家园、家庭网络、网络家居、智能家庭/建筑。

随着智能家居热潮在世界范围内的逐步兴起、我国电子技术的快速发展、人们生活水平的不断提高以及智能电子技术在生活中的广泛应用，智能家居已经成为未来家居装饰潮流发展的最新方向。从目前的发展趋势来看，在未来的至少 20 年时间里，智能家居系统将成为中国的主流行业之一，其市场的发展前景是非常广阔的。从目前来看，物联网大潮下的智能家居在中国乃至全世界都属于新兴的朝阳行业。按照当前的发展趋势，今后几年全世界将有上亿家庭构建智能、舒适、高效的家居生活，60%以上的新房都将具有一定的“智能型家居”功能，这将有助于智能家居系统形成一个庞大的产业，其蕴含的市场潜力不可低估。

智能家居系统包含控制管理系统、家居布线系统、家居网络系统、照明遮阳系统、安防监控系统、影音娱乐系统、家居环境系统共七大智能家居控制系统，如图 8-1 所示。

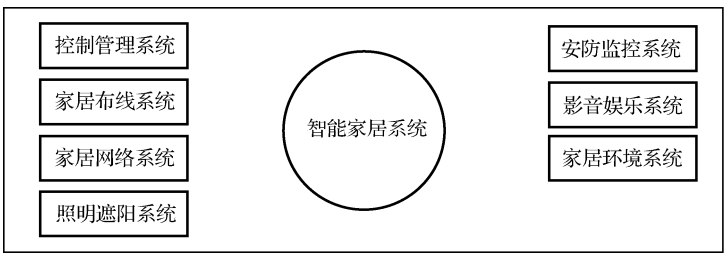


图 8-1　智能家居系统

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

1. 控制管理系统

控制管理系统是智能家居系统的核心，它能控制所有智能家居，将家中的各种设备连接到一起，提供家电控制、照明控制、窗帘控制、电话远程控制、室内外遥控、防盗报警等多种功能。

2. 家居布线系统

家居布线系统是智能家居系统的基础。它将有线电视线、宽带等弱电的各种线规划在有序的状态下，统一管理，以控制室内的电视、计算机等家电设备，使用更方便。

3. 家居网络系统

即使身处外地，用户也能通过互联网登录家庭智能家居控制界面来控制家里的电器。下班途中可提前打开空调或热水器。

4. 照明遮阳系统

通过照明遮阳系统能对家里的灯光实现智能管理，用遥控、远程、语音、手势等多种控制方式控制家里的灯光，而且能对灯光的功能做出改变。通过灯光控制随时控制家里灯光的场景，可以调节亮暗度、颜色、开关，通过智能窗帘和室外光线联动，达到最佳的灯光效果。

5. 安防监控系统

安防监控系统需要多个探测器，如烟雾检测报警器、燃气泄漏报警器、红外微波探测报警器等，另外还有视频监控系统。安防监控系统可以对火灾、陌生人入侵等进行及时监控，并且留下证据，保证生命财产安全。

安防监控系统主要包含：智能门锁、智能门铃、智能摄像头、智能传感器（人体传感器、门窗传感器、气体泄漏传感器、水浸传感器等）。

6. 影音娱乐系统

影音娱乐系统主要实现视听效果，随着智能音响的流行，以后语音可能会成为控制智能家居的媒介，把家里的所有视频影音设备巧妙、完整地控制起来。家里的影音设备可以共享影音库，节省了重复购买设备和布线的钱。

影音娱乐系统可以在房间内任何一个角落接收命令，并且能把想要的画面和声音投放到智能设备上，主要包含：智能电视、智能音响、智能魔镜、智能手机等产品。

7. 家居环境系统

家居环境系统可以根据室内的环境启动空气净化器、新风系统等设备，让环境更舒适健康。

智能家居系统结构如图 8-2 所示。它能让家里的所有电器设备按照用户的意愿来工作，让家居设备变得和人类一样充满“智慧”。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

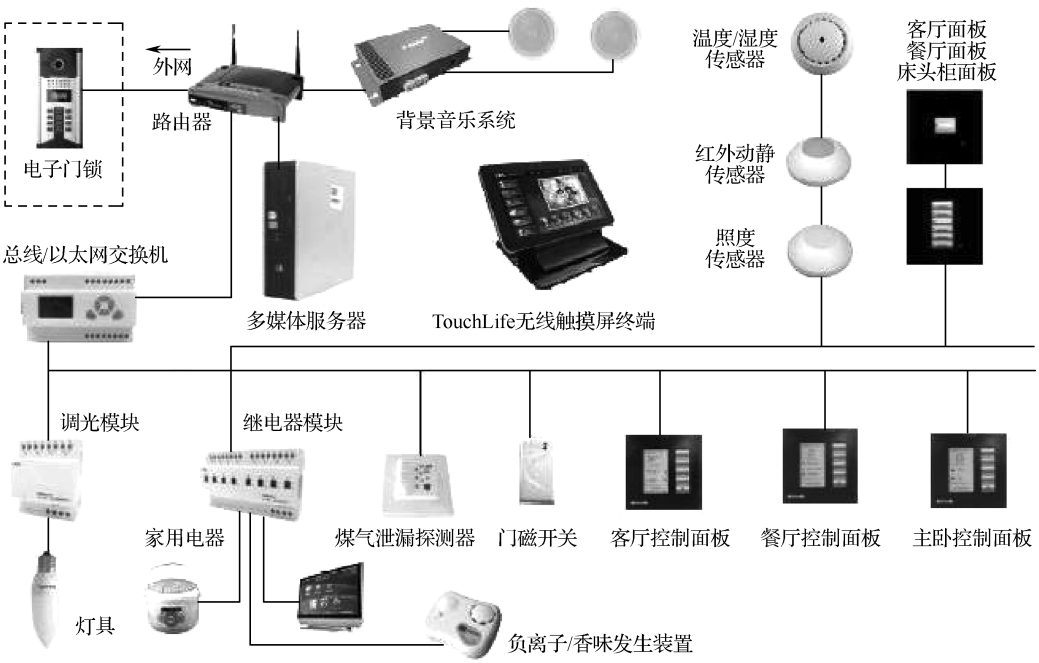


图 8-2　智能家居系统结构

8.1.2　智能家居的应用

越来越多的人开始接触、认识、使用智能家居，智能家居产品已经深入家庭的各个领域。那么智能家居到底能给人们的现代生活带来什么改变呢？

清晨你睁开惺忪的睡眼，伸个懒腰从床上坐起，灯自动亮起，穿好衣服后你说了一句“拉窗帘”，窗帘自己徐徐打开。智能系统提醒今日的天气以及分享晨间新闻资讯……

穿戴整齐后，准备出门。手机一键开启离家模式。灯光渐渐关闭，电视、空调等家电设备开始休息，安防系统进入戒备状态。

下班回家途中开启回家模式，空调自动运行调节室内温度，热水器自动加热，窗帘拉开。到家后门厅感应灯自动打开。

看电视时，客厅智能照明轻轻松松营造出电影院的观影氛围，可以和家人一起在沙发上看场电影。

有了智能家居，生活变得更加舒适便捷。那么智能家居的设计方案是如何实现的呢？

1. 庭院门及边界设计

1）庭院门入口

庭院门入口设置可视对讲机（图 8-3），带夜间红外感应，方便业主识别来访者音容。

2）周界防范

设置红外电子栅栏（图 8-4）用于庭院安防，布防状态下形成一道无形的红外电子围墙，物体通过电子围墙时自动向移动终端发送报警信号，让用户第一时间采取措施；联动摄像头、声光报警器，自动进行抓拍和现场告警。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

图 8-3　庭院门入口设置可视对讲机

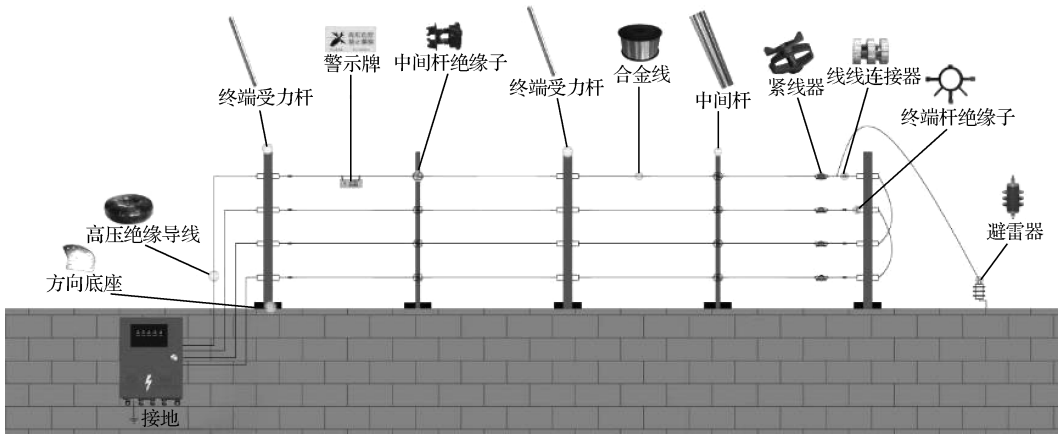


图 8-4　红外电子栅栏

高清室外枪式摄像头实时监控，有访客时，主人可以通过手机远程调节镜头，可以清晰看到来访者，同时录像机记录每个访客资料并实现自动抓拍，为生活提供可靠的保障。

2. 庭院活动区域设计

智能照明系统（图 8-5）可实现灯光软启、调光、一键场景、一对一遥控及分区灯光全开全关等管理，并可用遥控、定时、集中、远程等多种控制方式进行智能控制。

图 8-5　智能照明系统

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

3. 入门玄关设计（图 8-6）

图 8-6　入门玄关设计

1）入门

红外人体探测器：主人回家或客人来访时，灯光自动打开，方便客人按门铃，然后灯光自动延时关闭；设防状态下如有非法人员进入，会及时推送报警信息给主人。

智能门锁：它是家庭安防的第一道防线，功能强大，有多种开锁方式、防盗警报、亲情提醒、家居联动等功能。它适用于家庭每一个成员，是一个高性价比、体验感强的智能产品。

2）玄关

智能触控面板集多种开关于一身，可设置“回家模式”按键：完成撤防，开启大厅灯光，开启指定区域背景音乐，开启指定区域空调、窗帘、电器、新风系统等。

可设置“离家模式”按键：完成安防设防，关闭全宅灯光、空调、电器、地暖、背景音乐等。

可设置全宅灯光全开或全关，也可设置迎客模式，将大厅和起居室的灯光全部打开。

4. 客厅设计（图 8-7）

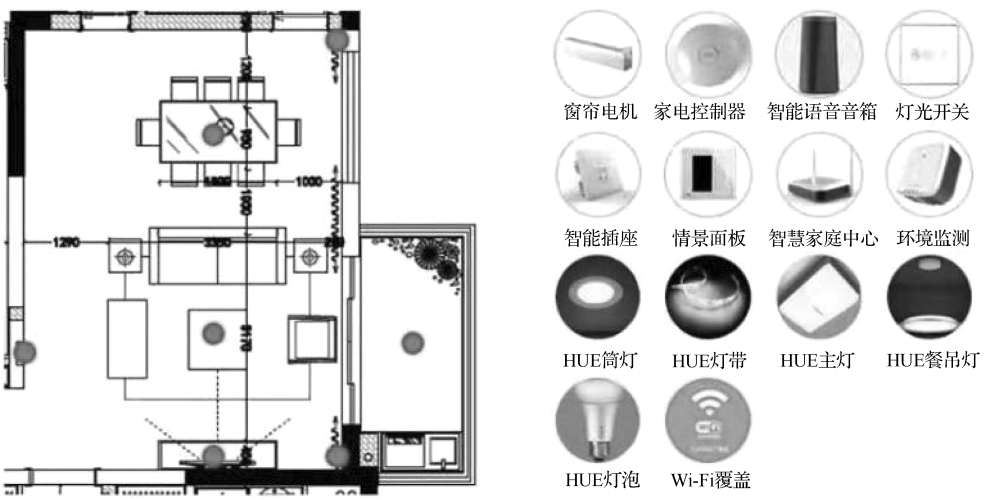


图 8-7　客厅设计

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

可进行灯光调节、电动窗帘（双层）控制、中央空调/地暖控制。

安装智能情景面板，控制客厅内所有灯光、窗帘及电器设备。

设置多个灯光场景：“看电视”“会客”“休闲”“调亮”“调暗”“自动”。

灯光场景效果可根据主人的喜好设定。在不同场合，只需要选择其中的一个场景，完美的灯光氛围就可瞬间转换。

安装环境监测系统，可根据室内环境联动新风系统，自动调节。

空调/地暖通过温/湿度传感器自动调节 ON/OFF、温度、风速、模式等，可用本地面板集中控制，也可用手机远程控制。

电动窗帘既可本地控制，也可和光照传感器设备联动，当检测到光线强时则自动关闭，光线弱时自动打开。

智能语音音箱：语音助手，可控制家中电器设备，还能查询天气、路况，听音乐、新闻，提供强大的内容服务和生活服务功能。

5. 厨房设计（图 8-8）

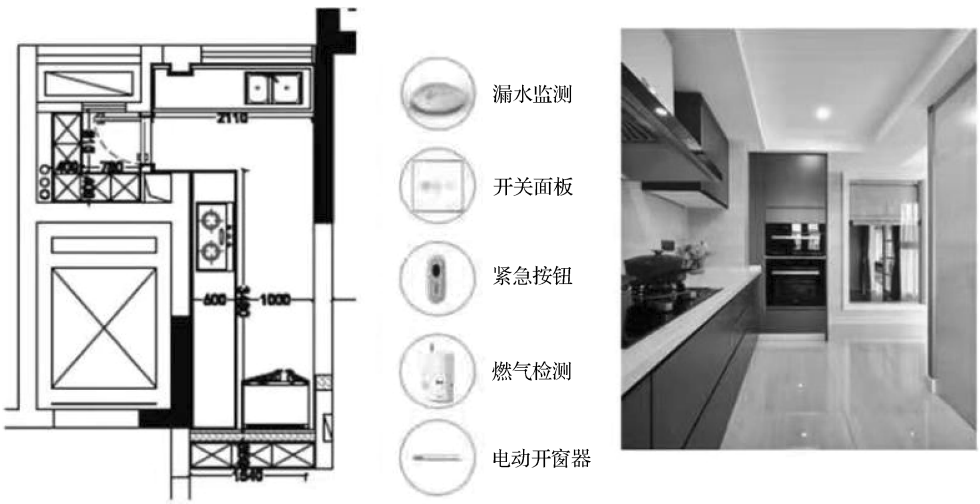


图 8-8　厨房设计

安装烟雾探测器，火险发生时，手机及时收到报警信息，本地联动声光报警器，推送信息到物业等。

安装可燃气体泄漏探测器、机械手控制器、智能插座等，燃气泄漏时，手机及时接到报警，同时自动关闭燃气阀门，打开窗户通风换气。

6. 卫生间设计（图 8-9）

装有人体移动传感器，人走过来后，灯光自动亮起，排气扇自动换气，人离开后，灯光和排风扇自动关闭，无须动手操作。

寒冷的冬季，主人可通过触摸屏来设置时间，定时开启卫生间的空调或地暖。比如清晨主人还在睡眠中的时候，就自动对卫生间加热，方便主人起床后使用。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

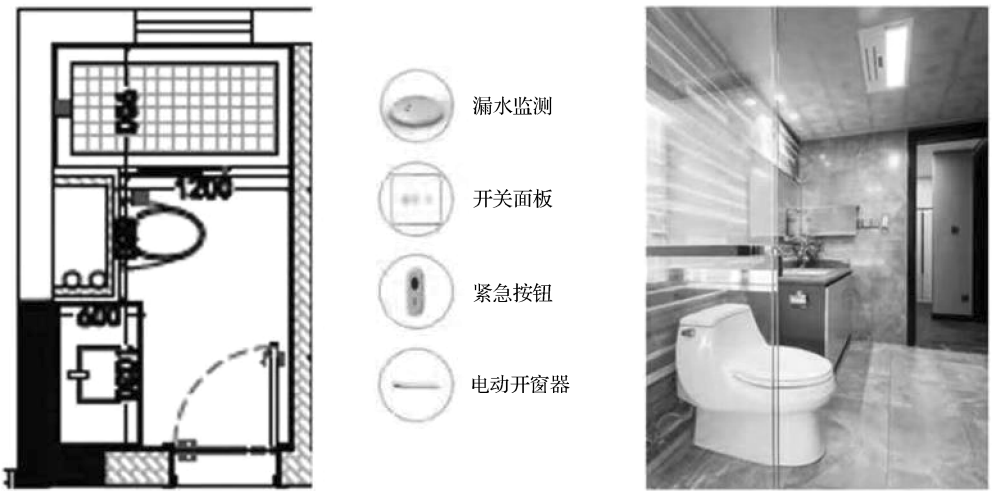


图 8-9　卫生间设计

晚上，当主人起夜时，卫生间的主灯光自动调整为 30%的亮度，避免刺眼。

安装漏水传感器，实时监测卫生间，漏水则自动关闭阀门。

智能魔镜：当你清晨在卫生间洗漱的时候，可以完全丢掉手机和平板电脑，仅通过语音交互的方式即可播放音乐、查看天气、浏览新闻、查看美妆教学视频。

7. 楼梯、公共区域设计

左右两侧楼梯设置步伐感应灯光，人来灯亮，人走灯灭，方便且节能。

电梯井设置感应灯光，人来灯亮，人走灯灭，方便且节能。

公共区域设置背景音乐，增添音乐美感。

8. 卧室设计（图 8-10）

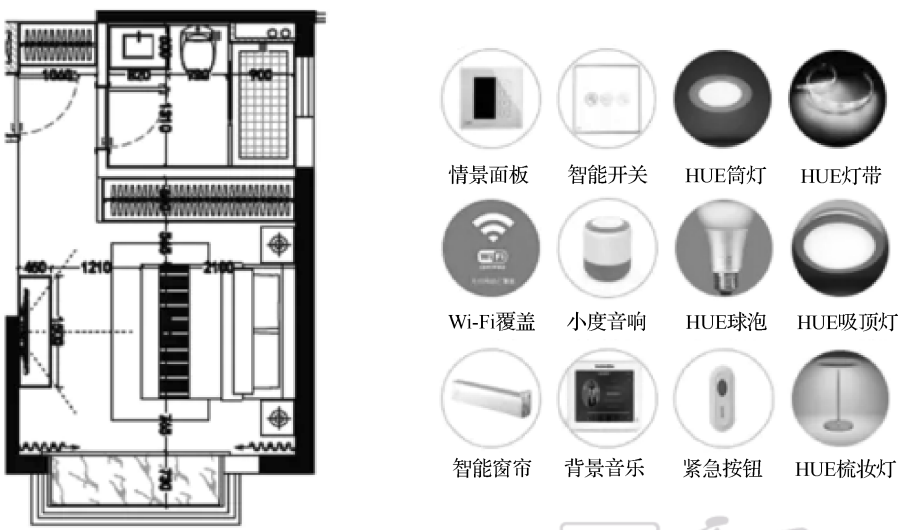


图 8-10　卧室设计

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

卧室可实现灯光调节、电动窗帘、环境监测等功能。

卧室入口和床头安装触控情景面板，一键管理，方便快捷。

设置多个灯光场景：“明亮”“起夜”“起床”“看电视”等。

起夜场景：地脚灯打开，卫生间的灯也同时打开。

起床场景：窗帘缓缓打开，背景音乐响起，热水器自动开启，电视播报最新新闻等。

每个卧室设有紧急报警按钮，以便紧急事件发生时使用。

智慧睡眠系统：多维度采集睡眠信息，实时监测心率、呼吸、翻身/离床等数据，当监测到异常数据时发出报警通知；智能形成睡眠分析报告，帮助改善睡眠质量；监测到主人入睡后，自动关闭电视，照明调整到睡眠模式，空调进入智能化运行状态，营造健康舒适的睡眠环境。

9. 影音室设计

家庭影院：智能娱乐产品，让家庭聚会、休闲时光变得更加浪漫。

10. 储物间、酒窖、车库设计

储物间和酒窖内照明采用红外感应器的方式进行控制，平时屋内灯光关闭，有人进入，灯全部自动打开，人离开时自动恢复原状。

出于安全考虑，把整个控制系统和设备放置在储物间。

红外入侵探测器兼具安防报警功能，夜间设防后，有人闯入立刻启动报警系统。

车库设置智能监控摄像头，有人非法闯入会留下影像资料，方便相关部门进行破案。

8.2 智能物流

8.2.1 智能物流概述

智能物流是指将物联网技术、大数据挖掘及分析技术、感知识别技术、远程监控技术及人工智能技术等有效地集成应用于物流活动的各个环节和主体。它是具有思维、感知、学习、推理判断和自行解决问题能力的高效物流系统，通过先进的物联网技术，整合物流业运输、仓储、配送、货运代理等各个环节的社会资源，实现物流业的智能化、自动化、信息化的运作和管理。

智能物流利用 AI、大数据、云、机器人实现操作无人化、运营数字化、决策智能化，最终形成从大规模自动化应用到智能无人化发展。人工智能等技术在智能物流中的应用可以分为硬件和软件两部分。硬件部分包括无人仓、无人机、配送机器人等各种自动化的物流设施设备，也就是物流系统的执行层面。软件部分包括利用人工智能等技术实现更准确的库存计划、线路规划、销售预测。同时，这些技术贯穿于物流活动的各个环节，促进物流效率的提高。

智能物流最显著的特点是准确高效，可以减员增效，可以使得产品质量和产量同步提升。另外就是可以帮助企业转型升级，从大规模的制造转向小规模的批量化定制，这都与智能物流的发展密切相关。智能物流在制造企业的外部供应链和内部生产中均处于核心地位。

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

智能物流的三大核心系统（图 8-11）包括思维系统、执行系统和信息传导系统。其中，思维系统是智能物流最核心的部分，通过云计算和数学手段对大数据进行分析和优化，从而形成决策，促进数据流程化。执行系统通过物流无人机、机器人等自动化的工具与设备对思维系统产生的决策采取实际操作。信息传导系统也称智能物流的网络通信系统，通过物联网技术和互联网技术把思维系统和执行系统连接在一起。这三大系统融合形成了智能物流系统。

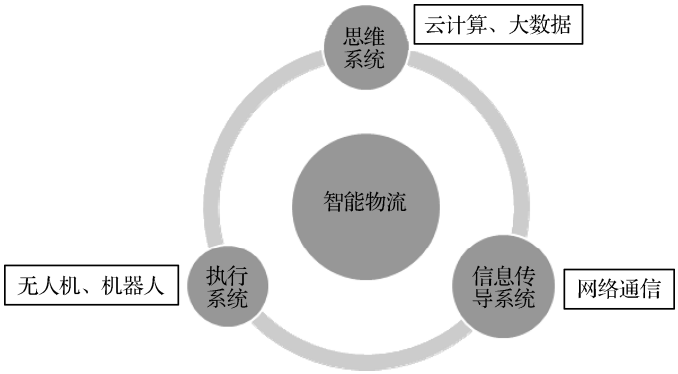


图 8-11　智能物流三大核心系统

智能物流的进化阶段如图 8-12 所示。

图 8-12　智能物流进化阶段

（1）机械化时期：叉车是这一时期的典型代表，它实现了作业的机械化，大大提高了搬运和装卸效率，减轻了工人的工作强度。

（2）自动化时期：这一时期出现了早期的 AGV 搬运系统，感应埋在地下的导线产生的电磁频率，从而指引 AGV 小车沿着预定路径行驶。路径相对固定，AGV 小车不具备自动避障能力，控制系统单一。

（3）高柔性自动化时期：这一时期的 AGV 在新的导航方式（激光导航、惯性导航、GPS 导航等）引领下路径变得多样化，控制系统也可以做到简单路径优化和避障。智能穿梭车的出现，使立库存储成为现实，大大提高了仓库的空间利用率，同时车辆控制系统可以与仓储管理系统无缝衔接，实现出入库的自动化，降低了人工成本，提升了物流运作效率。

（4）智能化时期：这个时期物流发展不再局限于存储、搬运、分拣等单一作业环节的自动化，而是大量应用 RFID、机器人、AGV 以及 MES、WMS 等智能化设备与软件，实现整个物流流程的整体自动化与智能化。这个时期的物流系统融入了大量人工智能技术、自动化技术、信息技术，如大数据、数字化等相关技术，不仅将企业物流过程中装卸、存储、包装、运输等环节集合成一体化系统，还将生产工艺与智能物流高度衔接，实现了整个智能工厂的物流与生产高度融合。

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

8.2.2 智能物流的应用

1. 案例一：京东智能物流

在新科技的推动下，物流将进入新时代。未来物流不仅要提供更高效、精准、满足个性化需求的服务，还要实现整个物流体系运行的无人化、运营和决策的智能化。针对未来智能物流，京东给出的答案是短链、智能和共生，如图 8-13 所示。

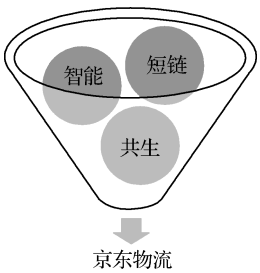


图 8-13　京东的未来智能物流

（1）短链即减少商品的搬运环节。过去，一个商品从生产出来到消费者手中，需要经过诸多环节，平均至少被搬运 5 次。现在品牌业者最多的诉求就是改变多级通路体系，通过物流直达消费者，了解消费者的真实需求。

京东物流设计的核心就是减少商品的搬运次数，通过庞大的覆盖网络与仓配一体模式等，将商品搬运次数从 5 次降至 2 次，实现了 90%以上的订单 24 小时内交货。

（2）智能即投入自动化设备来提升运营效率。继无人仓、无人机、配送机器人等的常态化运营后，京东物流的无人轻型货车、无人配送网站也将开始运营。

2017 年京东物流最小存货单位（SKU）数量扩大到 530 万个，日均订单上涨了 8 倍，运营 500 多个大型仓库，这样的复杂网络、庞大库存和海量订单均靠软件系统和资料来对采购、存货布局以及补货等进行分析和决策。

（3）共生即京东跟客户共生、跟行业合作伙伴共生，以及跟环境共生，联手各大品牌业者解决仓储、物流的难点。目前京东的 B2B 业务占其收入比重约五成，自建自主研发的物流体系与管理为其核心优势，成为许多国内品牌的合作伙伴。

2. 案例二：智能物流机器人

我国物流业正努力从劳动密集型向技术密集型转变，由传统模式向现代化、智能化升级，伴随而来的是各种先进技术和装备的应用和普及。当下，具备搬运、码垛、分拣等功能的智能机器人已成为物流行业中的一大热点。

下面介绍的是国内外智能物流中常见的几种机器人。

1）Kiva

2012 年亚马逊以 6.78 亿美元买下自动化物流提供商 Kiva 的机器人仓储业务后，利用机器人来处理仓库的货物盘点以及配货等工作。目前亚马逊的几十个仓库里，有超过 15000 个 Kiva 机器人（图 8-14）在辛勤工作。亚马逊因此拥有了全球最高效的仓库。

亚马逊将仓库工作分解成两部分：所有员工只需要在固定的位置进行盘点或配货，而 Kiva 机器人则负责将货物（连同货架）搬到员工面前。

2）Fetch 和 Freight 机器人

Fetch 和 Freight 是硅谷机器人公司 Fetch Robotics 的仓储机器人（图 8-15），Fetch 机器人可以根据订单把货架上的商品拿下，放到另一个叫 Freight 的机器人里运回打包。Fetch 相当于 Kiva 的升级版。Fetch 机器人具备自动导航功能，可以在货架间移动，识别产品，将其取下并

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

放到 Freight 机器人里，Freight 的作用则与 Amazon 的 Kiva 相当。机器人可以自助规划路线和充电，从而保证整个仓储系统的无缝运行。

图 8-14　Kiva 机器人

图 8-15　Fetch 和 Freight 仓储机器人

3）Transwheel 机器人

以色列申卡尔工程与设计学院的设计师设计出一款名为 Transwheel 的机器人。它采用自平衡系统，当机器人手臂载货时能脚踩单轮保持直立行驶，单个机器人可运送小包裹，如图 8-16 所示；而若干机器人协作可运送大包裹，如图 8-17 所示。此外该机器人可使用 GPS 系统进行导航，能通过面部识别软件确认接收者的身份；对于较大的物品，机器人也可以共同分担负载。同时其还具备智能取件的功能。它的设计者声称这种快递机器人甚至可以替代大型运输车辆，缓解交通拥堵。

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

图 8-16　单个 Transwheel 机器人

图 8-17　Transwheel 机器人协同工作

4）“盒子机器人”

Skype 创始人 Heinla 与 Friis 旗下的 Starship 公司推出了一种专门用于小件货物配送的“盒子机器人”。之所以这么称呼，是因为它的外形像极了一个配有六个轮子的储物盒，如图 8-18 所示，它最多可承载 20lb（约 9kg）的货物，最远可达到物流中心方圆 1mile（约 1.6km）的范围。由于其硬件上配置了一系列摄像头和传感器，能够保障其安全行走在人行道上，在指定时间从物流中心出发，穿越大街小巷，来到顾客家门口完成快递任务。在配送过程中，所携带的包裹都被严密封锁，接收者只有通过智能手机才能打开。Starship 表示，这台机器人最多可运送两袋食杂货物，能够处理 95%的包裹。它的成本比人力快递便宜，目前的平均快递费为每趟 5～15 美元，Starship 称未来可以削减至 1 美元。

图 8-18 “盒子机器人”

5）Bulter 机器人

Bulter 机器人相当于一个方形版本的 Kiva，如图 8-19 所示，由总部位于印度古尔冈和新加坡的机器人公司 Gray Orange 制造。这家创业公司由 Samay Kohli 和 Akash Gupta 于 2009 年建立，当时是希望做一些和教育培训相关的机器人，后来它演变成一个工业机器人制造公司，目前主要致力于在零售、物流以及仓库机器人领域构建业务。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

图 8-19　Bulter 机器人

6）Click&Pick 系统

Swisslog 是一家总部位于瑞士的自动化仓库和配送物流解决方案提供商，其背后是工业机器人“四大天王”之一的 KUKA（其持有 Swisslog 96%以上的股份）。与 Kiva 等货架式存储不同，Swisslog 的 Click&Pick 系统（图 8-20）采用的是一种三维的立方体网格架系统，每个立方体内有一个标准尺寸的箱子装着特定货物，如果装着所需货物的箱子埋在别的箱子下面，机器人会把上面的箱子拿起来堆在旁边，拿到货物后再放好。据 Swisslog 称，Click&Pick 系统一小时能处理一千张订单，速度是人类作业的 4～5 倍。

图 8-20　Click&Pick 系统

7）HITACHI 智能机器人

日立公司近日推出了一款机器人，该新型机器人可在物流仓库中移动并自动装卸和搬运货物，通过两只灵活的机械手，可从货架上移动各种尺寸、形状和重量的货物，如图 8-21 所示。这对于一般的机器人来说很难完成，尤其是物品形状、大小不一的情况下。其工作流程是，在移动平板车上安装两个升降台，并且分别安装操作臂型的机器人，其中一条操作臂可吸附物品，另一条顶端装有两根机械手指。通过调整升降台高度，并利用机械臂摄像头来确认货物，将符合需要的物品搬运或放置在指定位置。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

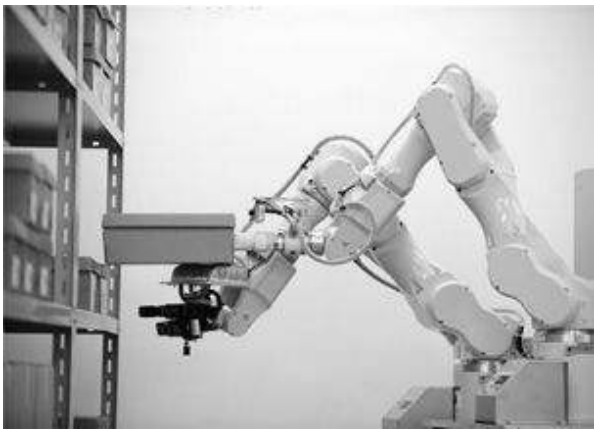


图 8-21　HITACHI 智能机器人

8）机器人“曹操”

虽然近年来国内机器人得到了快速的发展，但与欧美等国仍然有不小的差距。不过，随着工业 4.0 的发展，尤其是国内电子商务的发展，在物流环节中引入机器人是必然趋势。值得一提的是国内已有部分领先企业开始在仓储领域开展机器人作业。

天猫超市的“曹操”机器人（图 8-22）是一台可承重 50kg，速度达 2m/s 的智能机器人，造价高达上百万元，所用的系统是由阿里自主研发的。“曹操”接到订单后，可以迅速定位商品在仓库中的位置，并且规划最优拣货路径，拣完货后会自动把货物送到打包台。在“曹操”和工作人员的共同努力下，天猫超市在全国大多数地区已经可以实现当日达。

图 8-22 “曹操”机器人

8.3 智能电网

8.3.1 智能电网概述

智能电网，就是电网的智能化，它建立在集成、高速、双向通信网络的基础上，通过先进的传感和测量技术、设备技术、控制方法以及决策支持系统技术的应用，实现电网的可靠、

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

安全、经济、高效、环境友好的目标。其主要特征有坚强、自愈、兼容、经济、集成、优化。智能电网的核心内涵是实现电网的信息化、数字化、自动化和互动化，即“坚强智能电网”（Strong Smart Grid），如图 8-23 所示。

“坚强智能电网”以坚强网架为基础，以通信信息平台为支撑，以智能控制为手段，包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度环节，覆盖所有电压等级，实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合，是坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的现代电网。因此，“坚强”和“智能”是坚强智能电网的基本内涵。只有形成坚强网架结构，构建“坚强”的基础，实现信息化、数字化、自动化、互动化的“智能”技术特征，才能充分发挥坚强智能电网的功能和作用。

坚强智能电网的核心技术就是传感技术，利用传感器对关键设备（温度在线监测、断路器在线监测、避雷器在线监测、容性在线监测）的运行状况进行实时监控，电网关键设备监测如图 8-24 所示。然后把获得的数据通过网络系统进行收集、整合，最后通过对数据的分析、挖掘，达到对整个电力系统的优化管理。

图 8-23　坚强智能电网

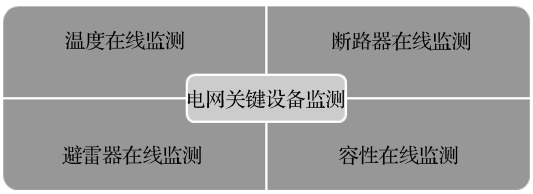


图 8-24　电网关键设备监测

建设坚强智能电网是适应我国电网发展新形势的战略选择，是继特高压取得重大突破后，电网发展方式的又一次重大变革和创新，体现在如下几个方面。

一是坚强智能电网以整体性、系统性的方法来客观描述现代电网发展的基本特征。坚强智能电网是一个系统的概念，是涵盖“发电、输电、变电、配电、用电、调度、通信信息”各个领域的完整的智能化系统。“坚强”与“智能”是现代电网的两个基本发展要求，“坚强”与“智能”本身相互交融，相互依存。“坚强”是基础，电网需要有坚强的网架结构、强大和安全可靠的电力输送和供应能力，满足大范围资源优化配置的需要。“智能”是关键，将各种新技术高度融合，信息化、自动化、互动化特征明显，是满足电力服务多样化的必然趋势。

二是“坚强”与“智能”并重，是立足我国电网发展实际的战略选择。为用户提供充足电力的基本要求和更加智能化的电力服务是电网建设必须并重的两方面，两者应当同步建设、同时推进，缺一不可。与电网规模已经基本稳定的欧美发达国家不同，中国电网发展要同时解决量的扩张和质的跨越。这就决定了我国智能电网的发展要坚持电网智能化与坚强网架建设协同推进，即建设坚强网架和智能系统有机统一，两者相互支撑、相辅相成。同时，在智能电网作为国际共同发展趋势的背景下，这也是我国电力工业自主创新发展和产业升级的必由路径。

三是在已有发展成果基础上继承发展，系统提升电网的智能化水平，培育新型业务及服务模式。建设坚强智能电网是在已有电网发展、技术积累等基础之上，充分发挥技术、体制和管理优势，按照整体性原则，系统提升电网的智能化水平，促进电网基础设施整体效益的充分发挥。包括信息、智能控制等技术在电网中融合应用，将带来信息通信服务、

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

能效及需求侧管理等新型增值业务。同时，电网智能化整体水平提升，用户种类增多，业务内容更加丰富，市场竞争性增强，也将促进电网进一步丰富和完善服务渠道、服务内容和服务方式。

8.3.2 智能电网的应用

1. 案例一：智能电网让生活更美好

随着社会的发展，智能电网已经逐步成为现代社会的一项重要基础设施。就像 20 年前的互联网给人们的生活带来的变化一样，智能电网将给人们的生产生活带来更多变化，有些变化也许现在能够看到，有些现在可能还看不到，智能电网能够更好地为城乡发展服务。智能电网可以进一步丰富城市服务内涵。在智能电网信息平台下，可以让智能小区、智能家居轻松实现。

智能电网促进更安全、更可靠的供电。现代生产生活都离不开电，我们未来对电的安全可靠供应的要求会越来越高。坚强可靠的电网需要监测、调度控制、运行检修等环节的共同支撑。应用智能电网的关键技术，可以实现电网的全面监控、灵活控制、便捷运维，提升电网的自愈能力，有效避免电力供应的中断，提高供电可靠性和用户供电质量，电力与信息安全融合的电力系统如图 8-25 所示。

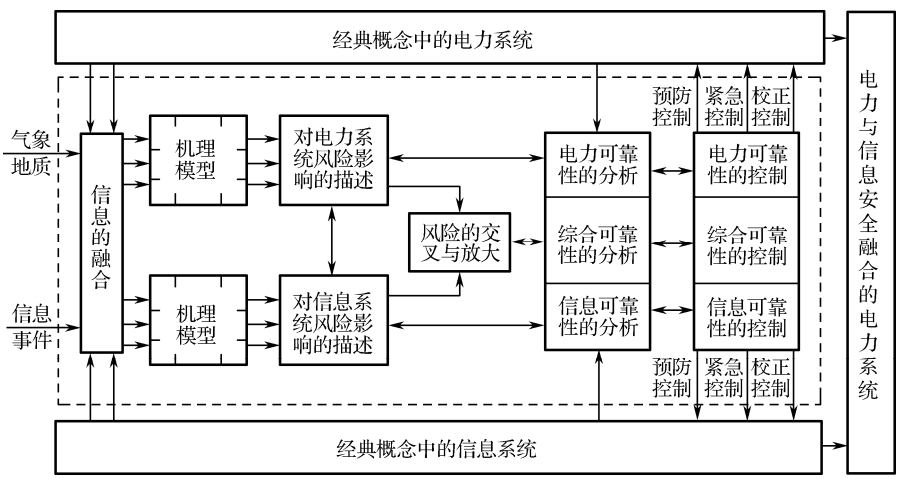


图 8-25　电力与信息安全融合的电力系统

智能电网包含的双向交互服务系统能很好地实现双方的信息交互，在为用户提供用电、用能服务的基础上，提供增值服务，实现智能用电管理，更好地参与公共市政管理。用户可以通过智能小区/楼宇实现对用能设备的监测与控制，实现居民能效智能管理和服务双向互动，为用户提供更安全、更可靠、更优质、更科学的用电服务。居民还可以通过双向互动服务平台，反馈自身的需求和建议，来完善社区的管理。

智能电网推动产业结构转型，助力经济低碳、可持续发展。通过延伸到各类用户的信息系统平台，实现智能用电管理，用户实时掌握用电数据，大幅提升能效管理水平。智能电网建设过程中，电网企业、相关设备和服务供应商、科研机构等利益相关方都将参与智能电网

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

的研究和建设。在此过程中，通过智能电网带来的新需求引导相关产业实现转型升级，同时也将创造一些新的商业机会和利益增长点。

2. 案例二：教你如何省电省开支

所有的超市管理者可能都会头疼一件事情：一天当中，总有那么几个小时，超市中的顾客零零散散，你却不得不为这些顾客，哪怕是一个人，打开所有的灯，开上足量的冷气或者暖气，否则你精心打造的优良口碑就毁于一旦。

实际上，在这几个小时里面，“偷偷地”关掉几个灯，少开几个角落里的空调，顾客的消费体验并没有什么不同。

这时你可能需要一个超市用电的整体解决方案，这里的方案并不是在早上 8 点你要亲自去打开所有的灯，而到了下午 3 点去关掉隔排的灯，以此优化用电。计算机终端可以为你解决所有的事情。

当然，你也不用自己去统计每天开几盏灯最划算，后台的计算机会统计出每个设备的用电量，然后帮你打点好一切。

你需要做的是对着电力公司开给你的电费单，去算一下这个月的纯利润又增加了多少。

这样是不是很棒？更棒的是，现在你的身边就有这样的服务出现了。

国家电网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司（以下简称武汉南瑞）就是一家研究如何帮你智能用电的公司。在武汉的外环以东方向，正在修建一座未来科技城。在这里，智能电网不仅是示范项目，也是这座卫星城中的供电、用电方式。

“我们通过用电终端反馈的用户信息，统计出用户端用电，甚至用气、用水的数据，哪些时段是用电高峰，哪些区域更喜欢在什么时候用电，哪些电器在哪些时段更容易被使用……然后对比分析，这样我们就可以为用户定制一套用电方案。”武汉南瑞高级工程师刘飞介绍，“这套用电方案是在后台执行的。如果你需要，在你踏进家门之前，电灯、电视、空调都已经打开。如果你有先洗澡的习惯，那就让系统设置成先烧热水吧!”

不止个人用户可以通过智能用电方案节电，企业也可以通过智能用电方案保证用电的稳定。

华为技术有限公司是最早一批落户武汉未来科技城的企业，对于华为这样的高科技企业来说，供电电流的可靠与稳定会直接影响产品的合格率，一个电压或频率的微小波动，就有可能让整个生产线上的产品全部报废。

通过监测厂区内的供电情况，后台会对厂区供电系统的运行状态进行实时监测，针对供电故障及时自动处理，不断地调整电源，保证生产线上的用电稳定。这也会为制造型企业节省一大笔开支。

不仅仅是用户，政府供电部门同样可以从这些数据中获益。智能终端收集到的用户用电信息，能够为供电部门提供电力调度借鉴，同时也可以监测到高耗能区域的用电情况，为需求议价提供良好的基础。

在生活、生产场景下，智能电网的应用更加侧重向现代服务业发展——探索后端并提供高效节能的用电规划。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

8.4 智慧农业

8.4.1 智慧农业概述

智慧农业是利用现代计算机技术和互联网手段与平台，通过专家经验和专家系统的指导，数字化模拟、加工与决策，使得农作物生长与产供销全过程智能化、数字化和信息化，实现农业信息采集、加工、处理和评价分析现代化、科学化和智能化。

智慧农业是“5S”技术（图 8-26）、“物联网+”、云计算技术、大数据技术及其他电子和信息技术与农业生产全过程结合的新发展体系和发展模式。运用“5S”技术快速进行土壤分析、作物长势监测，结合当时的气候、土壤情况进行分析，进而系统做出正确的决策，例如何时灌溉、灌溉多少，何时灭虫、施肥，何时收获，将农业生产活动、生产管理相结合，创造新型农业生产方式和经营模式。

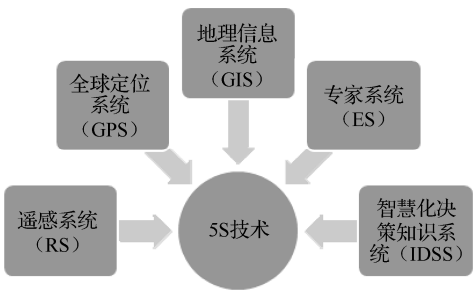


图 8-26 “5S”技术

“5S”技术体系中，RS 通过解译遥感数据源获取田地面积及类型，进行实时监测，并以遥感反演参数作为数据输入源；GIS 模块整合遥感和气象数据，集成数据存储分析功能，利用地理信息系统建立农田生态系统碳储量数据库，实现数据源的空间转换，并整合各类参数构建反演模型；GPS 模块将系统与 GPS 导航仪结合，得到农田作物分布和生长情况，绘制成图，根据这些信息建立相关的措施与决策；ES 模块能够根据农田作物分布特征，划分农作物产量贫瘠区与丰富区，得到农作物产量的等量图，为政府决策提供依据和支持；IDSS 模块支持决策人员解决处于管理系统不同状态的某一领域中的决策问题。“5S”技术体系具有良好的人机接口，以便科学地使 IDSS 与决策管理人员对话，充分发挥决策者的知识、经验和判断能力的作用。

物联网智慧农业平台系统由前端数据采集系统、无线传输系统、远程监控系统、数据处理系统和专家系统等组成。前端数据采集系统主要负责农业环境中光照、温度、湿度、土壤含水量以及视频等数据的采集和控制。无线传输系统主要将前端传感器采集到的数据，通过无线传感器网络传送到后台服务器上。远程监控系统通过在现场布置摄像头等监控设备实时采集视频信号，通过计算机或手机即可随时随地观察现场情况、查看现场温度和湿度等参数、进行远程控制调节与决策、指导农作物施肥等。数据处理系统负责对采集的数据进行存储和处理，为农业生产提供分析和决策依据。农业专家系统根据智慧农业领域一个或多个专家提供的知识和经验进行推理和判断，帮助进行决策，以解决农业生产活动中遇到的各类复杂问

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IN

题。物联网智慧农业平台系统如图 8-27 所示。

专家系统	解决遇到的各类复杂问题
数据处理系统	分析采集到的数据，制定决策
远程监控系统	现场布置摄像头，通过手机或计算机实时查看
无线传输系统	把数据传输到后台服务器
前端数据采集系统	采集农业环境中光照、温度、湿度等信息

图 8-27 物联网智慧农业平台系统

智慧农业的主要目标是建成融数据采集、数字传输网络、数据分析处理、数控农业机械为一体的数字驱动的农业生产管理体系，在农业生产过程中对作物、土壤实施从宏观到微观的实时监测，以实现对农作物生长、发育状况、病虫害、水肥状况以及相应环境的定期信息获取，生成动态空间信息系统，对农业生产中的现象、过程进行模拟，达到合理利用资源、降低生产成本、改善生态环境、提高农作物产量和质量的目的。从技术层面上讲，智慧农业是一门综合性的学科，涉及土壤学、作物学、气象学和信息技术等科学领域，即可通过遥感技术、地理信息系统、全球定位系统、专家系统和农业模拟优化决策系统来实现目标。

8.4.2 智慧农业的应用

1. 案例一：阿里 ET 农业大脑

2018 年 2 月，阿里云正式宣布与四川特驱集团、德康集团合作，通过 ET 农业大脑实现人工智能养猪，提高猪的存活率和产崽率，项目投入高达数亿元。

那么所谓的人工智能养猪到底是怎么实现的？

这里不得不先了解对于养猪场来说最重要的两个指标——PSY 和 MSY，简单来说就是每头母猪每年能产多少猪仔，以及有多少猪仔最终能长大成肥猪。目前我国养猪场的平均 PSY 约为 15，而美国则达到 25，也就是说中国每头猪比美国每年少生 10 头猪崽。

阿里推出了一套名为 ET 农业大脑的系统，涉及视频图像分析、猪脸识别（图 8-28）、语音识别、物流算法等人工智能技术。

图 8-28 猪脸识别

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

阿里研发出一套“怀孕诊断算法”来判断母猪是否怀孕。养猪场内的多个自动巡逻摄像头会收集母猪的睡姿、站姿、进食等数据，再由 AI 分析母猪是否配种成功，如果发现有母猪没怀上，系统将提醒工作人员进行人工授精，从而提高母猪产仔量。

猪仔出生之后，为了让它们健康成长，ET 农业大脑通过语音识别技术和红外线测温技术来监测每头猪的健康状况，由于猪在吃奶、睡觉和生病等不同状态下发出的声音都不一样，通过分析猪的咳嗽、叫声、体温等数据，一旦出现异常能够第一时间发出预警。

比如当猪仔被母猪压到时，这套系统能通过猪仔的叫声及时判断出来，并呼叫饲养员及时处理，提高猪仔的存活率，如图 8-29 所示。

此外，每头猪都有一个专用的身份标识耳环（图 8-30），记录它们的体重、进食以及运动强度、频率和轨迹，如果有哪头猪没达到标准，但是没有生病和怀孕的话，饲养员将这些猪赶到户外进行运动，ET 农业大脑会像微信运动一样记录每头猪一生走了多少步。

图 8-29　通过声音识别小猪的情况

图 8-30　身份标识耳环

2018 年，ET 农业大脑已经在四川的一家拥有 3000 头猪的养殖场进行试验，成功让母猪产仔量平均多了 3 头，猪仔的死淘率降低了 3%。

2. 案例二：京东植物工厂

京东植物工厂（图 8-31）确立了信任树立、标准建立、技术输出、品牌赋能和销售驱动“五位一体”的运营模式，还将直接利用京东物流、冷链仓储等缩短流通环节，实现直接从田间到餐桌的“京造”模式。

图 8-31　京东植物工厂

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

京东植物工厂将种菜业由以前的靠天吃饭变成了随时想吃就能生产出来，一年四季都可吃上反季节的蔬菜，而且可量产，科技化水平高，晴天雨天均可生产。关键是不用土，瓜果蔬菜只靠营养液与人造太阳灯就能听着音乐茁壮成长。京东植物工厂是如何种菜的呢？

1）蔬菜不用施肥，喝着“净水”长大

京东植物工厂采用的是水耕栽培方式。通过类似集装箱的装置培育秧苗，然后将秧苗移植到塑料大棚内，再通过人造太阳光和营业液进行水耕栽培，改变了我们几千年的传统土耕方式，如图 8-32 所示。

图 8-32　水耕栽培的种菜方式

2）绿色无残余农药，可直接吃

京东植物工厂的高科技还体现在该工厂采用了一套人工干预技术，通过控制温度、湿度、光照、二氧化碳浓度等因素，就能常年把环境保持在最适宜蔬菜生长的状态。配合营养液，蔬菜即可茁壮成长，营养远高于普通蔬菜和有机蔬菜。更为重要的是，在这种环境生长的蔬菜没有任何病虫侵害，也就不需要打农药和施各种肥料，长大后可以“干净”到不用清洗就能直接吃。

3）种植无菌化

为保证蔬菜能够在无菌的环境下生长，京东植物工厂的工作人员每次进去都要穿特制防菌服、戴口罩和工作帽并进行“消毒”，如图 8-33 所示。

图 8-33 “消毒”后才能进入京东植物工厂

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

4）控制成本，量产高，价格低

植物工厂面积小，对泥土的依赖小，依靠高科技实现精准管理，所以蔬菜可以全年无休地生长和收获，量产极高，1 顷地年产 300t 左右，这样就能有效控制成本，使人们能以低于市场价的价格吃上绿色无公害食品。

京东植物工厂通过深入农业生产种植和加工仓储环节的全程可视化溯源体系，把所有种植关键环节完全呈现给消费者；通过制定农场生产和管理标准，对农场环境、种子育苗、加工仓储包装等全流程进行规范化和标准化，以保证农产品的安全和品质；依靠物联网、区块链、人工智能等技术和设备，实现科学种植管理，降低农场生产成本，提升农场工作效率；通过京东在营销、金融、大数据以及京东植物工厂自身品牌等方面的能力，扶持农场进行品牌包装、推广和营销。

8.5 智慧交通

8.5.1 智慧交通概述

智慧交通是在整个交通运输领域充分利用物联网、空间感知、云计算、移动互联网等新一代信息技术，综合运用交通科学、系统方法、人工智能、知识挖掘等理论与工具，以全面感知、深度融合、主动服务、科学决策为目标，通过建设实时的动态信息服务体系，深度挖掘交通运输相关数据，形成问题分析模型，实现行业资源配置优化能力、公共决策能力、行业管理能力、公众服务能力的提升，推动交通运输更安全、更高效、更便捷、更经济、更环保、更舒适地运行和发展，带动交通运输相关产业转型、升级，智慧交通如图 8-34 所示。

智慧交通系统以国家智慧交通系统体系框架为指导，建成“高效、安全、环保、舒适、文明”的智慧交通与运输体系；大幅度提高城市交通运输系统的管理水平和运行效率，为出行者提供全方位的交通信息服务和便利、高效、快捷、经济、安全、人性、智能的交通运输服务；为交通管理部门和相关企业提供及时、准确、全面和充分的信息支持和信息化决策支持，智慧交通关系图如图 8-35 所示。

图 8-34　智慧交通

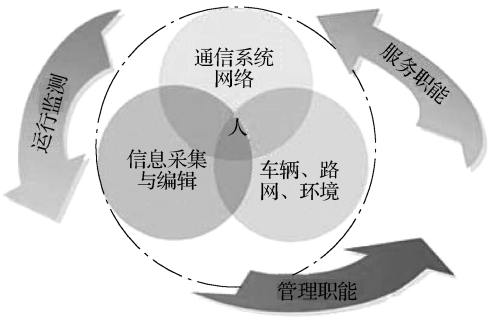


图 8-35　智慧交通关系图

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

1. 建设智慧交通路网

围绕基础设施感应设备配置，从新的公路、桥梁及场站等建设方案设计入手，配置交通智能感应设备，安装交通流量自动观测设备、视频监控及诱导系统等智慧交通装置，形成更加完善的交通路网感知体系，如图 8-36 所示。继续推进高速公路电子不停车收费系统建设，引导我国城市本地车辆安装使用高速公路电子不停车收费系统智能卡。在高速公路进出口、繁忙路段等交通现场安装交通流量引导显示屏，提供实时路况信息，提高道路利用率和通行能力。建立社会化信息共享联动机制，通过电视、电台、网站及移动终端等媒介准确及时地发布交通信息。提高基础设施、运输工具和运行信息等要素资源的在线化水平，推进交通运输资源在线集成。利用物联网、移动互联网等技术，进一步加强对公路、铁路和民航等交通运输网络关键设施运行状态与通行信息的采集。

图 8-36　形成更加完善的交通路网感知体系

2. 发展智慧交通装备

将地理信息系统、卫星定位系统及射频自动识别系统等智能安全管理装置逐步推广到所有车辆。

3. 实现智慧交通出行

完善客运联网售票平台，实现全程道路客运联网售票，发展公路、铁路及航空等运输方式之间的“一站式联网售票”。依托支付宝、网银等支付中介，推广网上售票支付结算，如图 8-37 所示。推进区域道路客运综合信息服务平台建设，实现市、区、县之间的联网。

图 8-37　多种购票及支付方式

充分利用互联网，将交通门户网站出行信息、交通联网售票系统、智慧交通流量引导系统、电子地图、出租车电招等信息资源进行整合，构建基于互

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

联网平台的立体化公众出行服务平台，实现多种出行方式信息服务对接和一站式服务。

4. 加强智慧交通管理

立足行业之间、各级交通行政部门之间的信息共享，建设综合交通运输信息网络平台，建立信息管理和指挥控制系统。围绕汽车后市场、驾驶员培训市场等需求建设运管服务平台，完善运政业务审批，营运车辆、从业人员和企业档案管理，服务质量信息管理，运政监督检查管理及运政综合指挥等功能。应用公路综合信息移动采集技术，逐步提高路网数据采集设备、公路及附属设施（桥、隧）的检测评价设备和移动监控设备的配备水平。

8.5.2 智慧交通的应用

1. 案例一：国内智慧交通的发展

1）上海市

上海市于 2002 年开展了“上海市智慧交通系统应用试点示范工程”项目，对系统、技术、管理和运行等多个示范工程进行了深入研究和全面规划，建成了交通信号控制自适应系统、城市道路交通监控系统、停车诱导系统、交通违章监测系统以及应急处理与实时监测等智慧交通管理系统。

2008 年 3 月，上海市交通信息中心建设了上海市交通综合信息平台，并负责运行维护。该平台基于美国环境系统公司的 ArcGIS 平台，是全国首个全面、实时整合、处理全市道路交通、公共交通、对外交通领域车流、客流及交通设施等多源异构基础信息数据资源，实现跨行业交通信息资源整合、共享和交换的智慧交通平台。

2）北京市

北京市在“十一五”期间就已经明确提出加强智慧交通体系建设，并在“十一五”期间构建了以一个共享信息平台、两个数据中心和七大应用领域为框架的智慧交通体系。

“十二五”期间，北京市在智慧交通系统建设上规划了一个中心、三项工程、十八个任务。一个中心是指交通运行协调指挥中心，包含路网运行、运输监管和公交安保三个分中心；三项工程是指公众服务工程、信息化应用工程和信息化基础工程，最终形成一体化、智能化综合交通指挥支撑体系，成为数据共享交换中枢、综合运输协调运转中枢、信息发布中心，紧急情况下为交通安全应急指挥中心。

“十三五”期间，北京智能交通将处于从分散到集约、从自成系统向协同共享、从以政府推动为主向政府社会合作推进的重要转型期，智能交通将由信息化、智能化向更高阶段的智慧化方向发展，将进入全面互联、数据驱动、业务协同、智慧应用的新阶段。

2. 案例二：国外智慧交通的发展

1）美国

美国是应用智慧交通系统较为成功的国家之一。美国智慧交通系统始于 20 世纪 60 年代末期的电子路径导向系统。20 世纪 80 年代中期，加利福尼亚交通部门研究的 PATHFINDER 系统获得成功，此后开展了一系列这方面的研究。

2009 年 12 月，美国交通部发布了《智慧交通系统战略研究计划：2010—2014 年》，目标是

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

利用无线通信建立一个全国性、多模式的地面交通系统，形成一个车辆、道路基础设施和乘客之间相互连接的交通环境。该计划的核心是智慧驾驶，强调了车与车互联。2015 年 1 月，美国交通部启动互联网汽车项目，该项目分为概念车发展、制造测试设计和运行维护 3 个阶段。

2）欧洲

欧洲的智慧交通系统发展始于 20 世纪 60 年代的自动车辆监控系统。早期欧洲智慧交通系统的发展主要由各国独立研究，各国之间合作比较有限。随着欧盟架构计划以及政府与企业提出的联合研究组织的推动，欧盟各国才逐渐开始合作。欧盟智慧交通系统的发展由欧盟执委会下的交通与能源署主导。2011 年 3 月欧盟推出智慧交通系统 2020，其三大目标是交通可持续、提升竞争力和节能减排。

8.6　智慧医疗

8.6.1　智慧医疗概述

智慧医疗是通过打造健康档案区域医疗信息平台，利用最先进的物联网技术，实现患者与医务人员、医疗机构、医疗设备之间的互动，逐步达到信息化，如图 8-38 所示。在不久的将来，医疗行业将融入更多人工智能、传感技术等高科技，使医疗服务走向真正意义的智能化，推动医疗事业的繁荣发展。在中国新医改的大背景下，智慧医疗正在走进寻常百姓的生活。

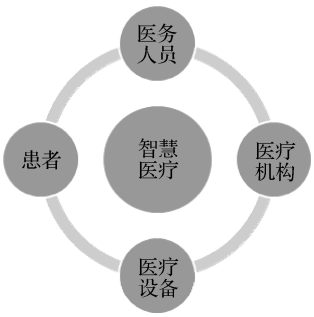


图 8-38　智慧医疗

随着人均寿命的延长、出生率的下降和人们对健康的关注，现代社会中人们需要更好的医疗系统，急需远程医疗、电子医疗（E-health）。借助于物联网、云计算技术、人工智能的专家系统、嵌入式系统的智能化设备，可以构建完美的物联网医疗体系，使全民平等地享受顶级的医疗服务，杜绝或减少由于医疗资源缺乏所导致的看病难、医患关系紧张、事故频发等现象。

基于物联网的智慧医疗系统的主要目的是让医院有限的医疗和人力资源得到最大发挥，让亚健康人群及时获得预防性诊疗，也让患者享受到方便、快速、均等的医疗服务。因此，该系统需要满足以下几方面要求。

（1）系统规范化、标准化。规范化和标准化是智慧医疗系统构建的基础，也是智慧医疗系统与其他系统兼容和扩展的保证。因此设计系统时，各类感知设备应有统一的数据采集规范，各种网络应有统一的数据通信标准。

（2）系统易操作。目标用户为各个年龄层的患者和亚健康人群，系统只有简单便捷、交互人性化，才能满足用户的实际需求。

（3）系统可拓展性和灵活性。系统在设计中应为新应用研发预留相应的外部接口，同时不影响原有应用的使用效果，这样方便用户灵活使用。

（4）系统安全性。医疗数据涉及患者的个人健康敏感信息，系统需要多层次、多措施增强应用服务的安全性，比如在数据传输时可采用权限控制管理、通信数据加密和无线局域网防护等手段。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

8.6.2 智慧医疗的应用

1. 案例一：移动医疗系统

移动医疗是基于物联网的智慧医疗系统最具潜力的应用之一，也是区域医疗卫生信息化的主要方向。它泛指通过使用通信技术进行医疗数据非本地共享的系统，且功能涵盖非本地医学急救、监护、诊断、治疗、咨询、保健和远程教育等诸多方面。以下将通过家庭健康监护系统这个示例来说明智慧医疗系统在移动医疗方面的应用。

随着传感器技术的快速发展，多种无线医疗传感器组成的无线传感器网络面向家庭监护成为可能。无线医疗传感器是一种高精度、小体积、低功耗、高度自动化的便携式设备，能够检测相应的生命体征数据，如图 8-39 所示。

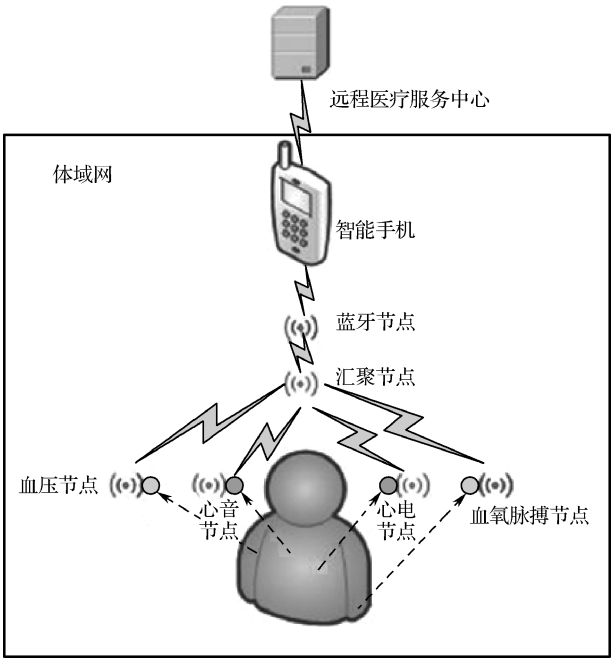


图 8-39　无线医疗传感器

家庭健康监护系统利用多种植入式、可穿戴式和接近式等无线医疗传感器采集人体的各种生理参数，如脑电图（EEG）、血压（BP）、心电图（ECG）、肌电图（EMG）等。自动将生命体征数据上传至终端设备，为每一名用户建立一个实时动态的电子健康档案，让“死”档案变“活”。在任何一个嵌入式设备如 Android 智能手机上安装一个 APP，就可以代替 PC 成为监护系统的控制终端。系统利用终端设备的蓝牙、GPRS 或 Wi-Fi 接口实现数据库的远程共享，用户和医生双方凭借登录密码就可随时随地查询相关的生命体征数据，以及医生的健康管理建议，实现医疗数据的共享。

2. 案例二：智慧医院服务系统

智慧医院服务系统是基于物联网的智慧医疗系统在医患服务方面最重要的应用场景。长

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

期以来，医疗卫生服务是以医院为中心的，患者到医院就医最直接的体验就是长时间排队。智慧医院服务系统以患者为中心，可以将医院、医生和患者连接起来，实现医疗信息的即时传递，把医院服务窗口延伸到患者手机上，如在线咨询、预约诊疗、候诊提醒、诊疗报告查询、药品配送等便捷服务，改善患者的就医体验。

对于普通患者，去医院就医前，可通过智慧医院服务系统进行医院查询、就医指导、预约挂号，就医后凭借一卡通，便可享受全流程服务；还可通过该系统进行候诊查询、检验检查报告查询、门诊处方线上支付、用药提醒以及预住院管理等。这样不仅节省了患者宝贵的时间，而且减轻了医护人员的工作量，提高了医疗服务质量，医疗信息管理系统如图 8-40 所示。对于区域医疗患者或特殊病情患者，可通过该系统进行远程就医；医生通过临床路径中结构化、标准化的临床诊疗数据快速有效地了解患者病情，以便采取针对性的医疗措施，大大减少误诊和医疗事故的发生。

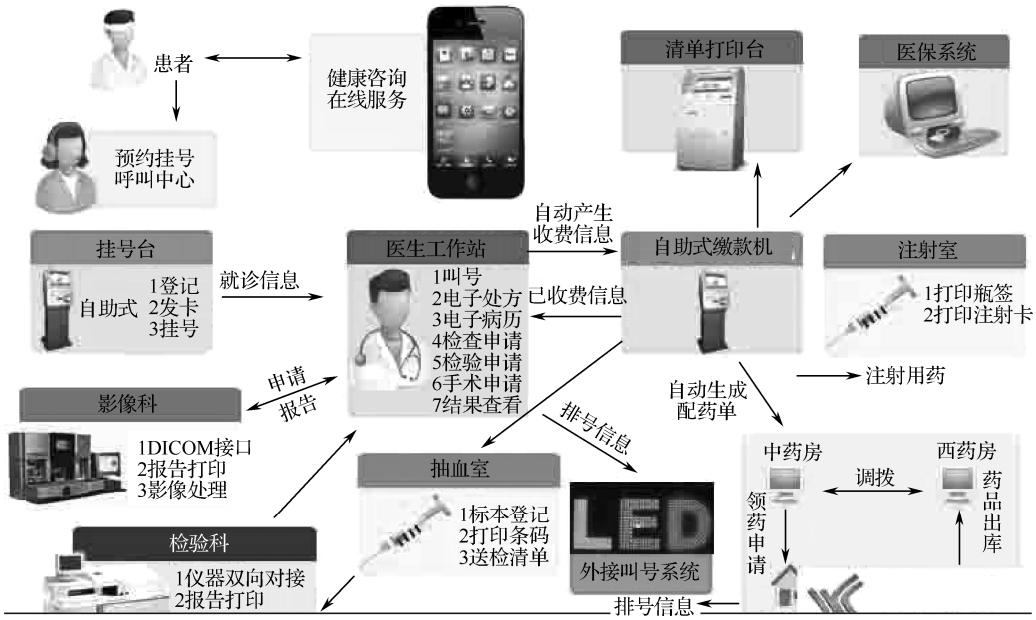


图 8-40　医疗信息管理系统

智慧医院服务系统可打破地域、时间、专家资源不均等限制，整合时间碎片，为患者提供更为开放、均等的医疗服务，并开启全新、便捷的就医体验；同时，还可以最大限度地发挥大型医院专家对基层医院的帮扶作用。

8.7　智慧环保

8.7.1　智慧环保概述

智慧环保是指通过应用物联网、云计算、大数据等信息技术，构建一个全面感知的信息化基础环境，对污染源、环境质量等环境管理要素进行全面感知、实时采集和自动传输，对环境信息资源进行统一存储、高效整合、全面共享、深度挖掘和智能分析，对业务流程进行

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

再造，最终实现环境保护的监测自动化、管理精细化、业务协同化和决策智能化，达到改善环境质量状况，提升居民的生活质量和舒适度的终极目的，如图 8-41 所示。

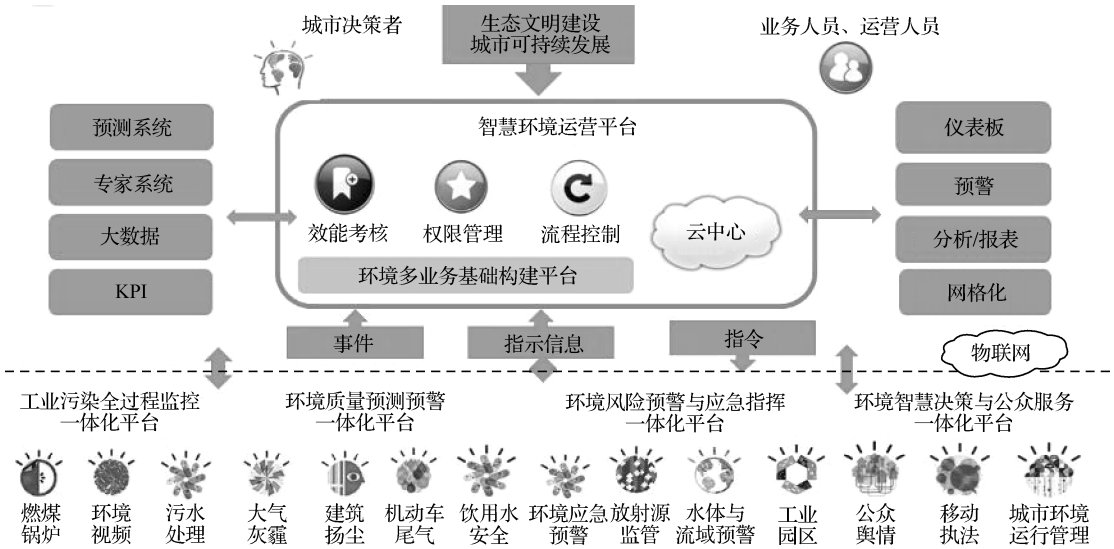


图 8-41　智慧环保

智慧环保是物联网技术与环境信息化相结合的概念，其特征可以归结为以下三方面。

感：利用任何可以随时随地感知、测量、捕获和传递信息的设备、系统或流程，实现对环境质量、污染源、生态、辐射等环境因素的“更透彻的感知”。

传：利用环保专网、运营商网络，结合 4G、卫星通信等技术，将个人电子设备、组织和政府信息系统中存储的环境信息进行交互和共享，实现“更全面的互联互通”。

智：以云计算、虚拟化和高性能计算等技术手段，整合和分析海量的跨地域、跨行业环境信息，实现海量存储、实时处理、深度挖掘和模型分析，实现“更深入的智能化”。

业内提出的关于智慧环保的解决之道：首先，要明确建设理念和服务理念，服务对象包括政府的环境管理、监测和研究部门，污染排放及治理企业，其他社会机构和社会公众等；其次，现阶段环保物联网建设和应用必须强调周密的配套设计，与各方保持密切联系；再次，要明确环保物联网建设和应用的范围，通盘考虑环保物联网应用的服务体系、应用体系、信息资源体系、管理体系、基础设施，统筹好各部分之间的依赖关系，使其能有效支撑、协同发挥作用；最后，要把握好国家和地方的关系，考虑中央、地方的制度体系及其管理的优化，做好环保物联网建设、应用和运维的财政、行政等体制、机制统筹，并把顶层设计上升到决策高度，保证顶层设计的落实。

8.7.2　智慧环保的应用

1. 案例一：广西环境信息化建设

“以前危险废物转移联单盖章后，跑运输、处置单位走程序，再到环保部门存档，光转移联单就有上千份，真的‘跑断了腿’。现在通过一部手机，申报的危废转移业务全程实现在线

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

办理。”这只是广西壮族自治区环境信息化建设成效的一个缩影。

2012 年建成的广西环境监管与预警信息系统，上连原环境保护部、下连直属单位与 14 个市局，业务覆盖、信息整合了“五个一”工程，即“一个顶层框架、一个统一平台、一个数据中心、一张基础地图、一个云计算中心”。坚持所有的子系统在同一个网络中运行，所有数据在广西生态环境数据中心（图 8-42）交换，所有处室和单位在同一个平台上办公。这样一来，解决了信息化建设中数据互联互通、交互共享等难题，提高了数据信息来源的权威性。

图 8-42　广西生态环境数据中心

近年来，广西生态环境厅利用大数据、云计算，不断提升环境信息化服务水平，促进信息化服务从业务运用向服务公众转变。

对内，为执法人员配备执法终端设备，通过移动执法系统实现 32 种常见环境违法行为调查询问、现场检查、笔录等工作的模块化、表单化、信息化。移动执法系统与自动监控系统平台深度融合，企业在线监控数据超标预警可实时推送到移动执法系统，并可利用大数据对高危企业进行预测分析，做到精准执法、精细化管理。

对外，构建广西一体化网上政务服务平台，企业和群众依申请办理事项全部实现网上办理。在该平台上，生态环境相关的 56 个依申请办理事项中有 42 个事项实现“只用跑一次”，14 个事项实现“一次不用跑”。

在公众参与方面，将“广西生态环境”公众号与生态环境厅官网上的环境数据中心对接。广西居民只要打开微信公众号和官方 APP，随时随地可查询广西各地环境质量实时监测数据。

近年来，在助力蓝天保卫战方面，广西运用信息化手段，对环境空气质量、污染源、污染物等数据深入分析，制定“一市一策”，精准研判。

广西充分应用机动车遥感监测、网格化信息系统、无人机、遥感卫星等技术手段，加强对污染物来源的分析研究，预测污染发展趋势，对相关污染物实现精准管控，有效遏制污染峰值。

在助力碧水保卫战方面，广西建成南流江流域污染防治三维地理信息系统，全面、直观地掌握南流江流域涉污、防污情况，分析水质变化趋势，识别主要污染来源，为精准治污提

电子工业出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

供决策支持。

在助力净土保卫战方面，建立的土壤污染环境管理平台，涵盖土壤环境质量、污染分布等数据，实现土壤环境信息化管理。

2. 案例二：衢州——生态文明建设先行者

衢州市借助物联网、大数据等，致力于打造智慧环保执法监管新模式，以最严格的环保监管，补齐生态环保短板，筑牢钱江源头生态屏障。

1）联合办公、实战化运作，做到 24 小时实时预警监控

衢州市环保局在全省率先启动“智慧环保”项目建设，基本建成集“实时监测、全面监控、应急预警、高效指挥、教育展示”等多项功能于一体的“智慧环保”全覆盖体系。通过智慧环保平台建设，实现区域环境质量、重点工业污染源、规模化畜禽养殖场、城镇污水处理厂在线监测监控全覆盖。智慧环保平台共整合了全市 20 个汇入衢江一级支流入河口水质自动站、5 个跨行政区域交接断面水质自动站、5 个饮用水源自动站、13 个大气自动站、1470 套污染源自动监测设施（其中工业污染源 259 套、集镇污水处理厂 35 套、规模化养殖场 1176 套）、96 家重点企业刷卡排污系统、70 家危废单位全过程监控系统，做到了 24 小时实时预警监控。同时，成立了智慧环保监控指挥中心，整合环保及相关部门力量，实行联合办公、实战化运作，确保一有异常情况，及时调度、第一时间处置。平台运行情况由市政府分管市长负责，每月汇总、分析、通报，形成环境问题会商、交办、督办、反馈制度。

2）环境医院，为环境问题把脉问诊，做到对症下药

衢州全市环保监管重点企业已达 3000 多家，此外还拥有浙江最大的化工基地——巨化集团公司，监管压力较大。为此，衢州市环保局与省环科院、省环境监测中心签订战略合作协议，依托其强大的人才、技术力量，成立全省首家环境医院，并作为一支重要的力量引入环保执法监管。每年根据工作需要，政府购买服务，为企业免费“体检”。环境医院设有水污染防治、大气污染防治、固体废物污染防治、辐射污染防治等“专科门诊”，能及时为排污企业环保问题“把脉问诊”，为政府环保决策、环保执法监管提供技术服务，做到“对症下药”，实现精准化执法、精细化监管。

3）公众参与，设置举报奖金，深化群众参与深度与专业度

借助智慧环保项目，开发“爱环保”手机 APP，实时公开环境质量、发布环保新闻、快速受理群众投诉，该 APP 在各应用下载平台累计下载量已达 50000 余次，初步构建了覆盖全市的环保公众交流平台；加大环境违法行为有奖举报力度，制定《衢州市“五水共治、四边三化、三改一拆”和环境保护违法行为举报奖励办法》，将举报最低奖金设为 3000 元，奖励数额与案件罚款金额相挂钩，鼓励群众参与；建立环保志愿者队伍和环保产业协会，深化公众参与的深度和专业度；实施“阳光排污口”工程，将企业排污口从厂区内移到厂区外，统一铭牌标示，方便公众监督。开展“双随机一公开”执法，每季度通过摇号方式抽取本季度日常监管检查企业和执法人员，并邀请市人大代表、政协委员、媒体记者参加执法，增强环境执法的公正性和透明度。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

8.8 感知城市

8.8.1 感知城市概述

以信息和通信技术作为基本发展战略，城市的发展经历了从有线城市、数码城市、数字城市、智能城市到智慧城市的发展历程。其中，智慧城市是当前城市发展的最高阶段。智慧城市由“无处不在的硬件”所组成，即将数字仪表设备和无处不在的计算植入城市的每一个角落，例如，无线网络、传感器和摄像头等设备。基于这些设备所采集的相关数据，城市用户可以通过基于智能手机的实时计算参与和调控城市中的相关进程。由于传感器的爆发式增长和大数据的流行，目前城市的发展已经逐步进入新的阶段——感知城市，如图 8-43 所示。

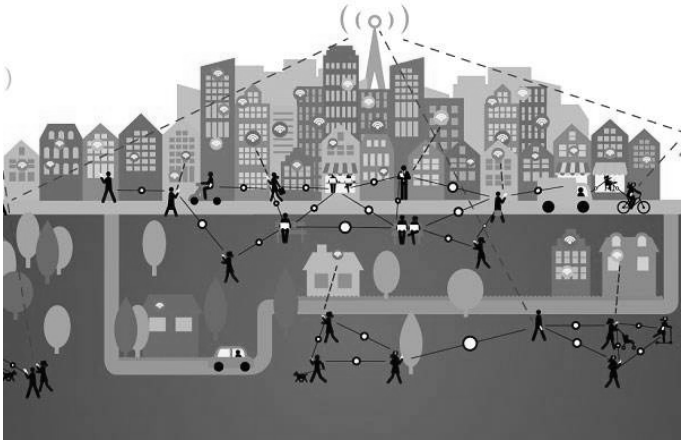


图 8-43 感知城市

感知城市是指通过物联网等信息与通信技术，构建一个高感知度的城市基础环境，实现城市内及时、互动、整合的信息感知、传递和处理，以提升民众生活幸福感、增强企业经济竞争力、城市可持续发展为目标的先进城市发展理念。

“十二五”以来，许多城市提出了更高级别的城市信息化建设目标，纷纷开展感知城市的建设。感知城市应用了三种建设模式。

1. 以物联网产业发展为驱动

以物联网产业发展为驱动的建设模式是在感知城市的建设过程中，重点发展物联网相关的产业，出台物联网产业扶持政策，大规模建设物联网产业聚集园区，吸收、培养科研人才，扶持一批重点企业，形成一批示范项目，按照先培育产业发展、再拉动社会应用的模式来进行感知城市的建设。

以物联网产业发展为驱动进行感知城市建设的有天津、大庆、廊坊、无锡、常州、杭州、合肥、济南、广州、佛山、东莞、成都、贵阳、西安等。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2. 以信息基础设施建设为先导

以信息基础设施建设为先导的建设模式是在建设感知城市过程中，大力建设城市信息基础设施，铺设光纤骨干网，实现有线网络入户、无线网络覆盖公共区域，增加网络带宽，提高网络覆盖率，推进三网融合，大规模部署无线信息采集设备，以建成无论何时何地都可以互联互通的城市信息网络。

以城市基础设施建设为先导进行感知城市建设的有上海、重庆、南京、扬州、温州、福州、厦门、烟台、江门、云浮等。

3. 以社会服务与管理应用为突破口

以社会服务与管理应用为突破口的建设模式是在建设感知城市时，重点建设一批社会应用示范项目，在公共安全、城市交通、生态环境、物流供应链、城市管理等领域开展一大批示范应用工程，建设一批示范应用基地，重点突破、以点带面、逐步深入地进行感知城市建设。

以社会服务与管理应用为突破口进行感知城市建设的有北京、唐山、沈阳、苏州、镇江、宁波、青岛、淄博、郑州、武汉、深圳、昆明等。

8.8.2 感知城市的应用

目前，很多国家已经开始感知城市的建设，主要包括美国、瑞典、爱尔兰、德国、法国、中国、新加坡、日本、韩国等。大部分国家的感知城市建设都处于有限规模、小范围探索阶段。

1. 案例一：美国迪比克市

2009 年，美国中西部爱荷华州的迪比克市宣布将建设美国第一个绿色环保的“感知城市”。迪比克市利用互联网、计算机、传感器、软件等一套智能系统，将能源、水务、交通等系统信息化，并实现互联，这样就可以进行感应、整合并分析，以此来更好地理解并管理相关资源的消费情况，指导政府、企业和市民的用水、用电和交通运输。

该计划第一步就是要安装数控水电计量器到户、到店。智能水电计量器中使用了低流量传感器技术，防止公共设施和民宅水电泄漏，减少浪费。迪比克市同时也在搭建实时可持续发展综合监督平台，这一平台能够对来自新来源的信息进行整合、分析并展示。

2. 案例二：新加坡

新加坡政府确定了四大关键性战略：

（1）构建全国资讯通信基础设施，包括建设超高速且具有普适性的有线和无线两种宽带网络；

（2）发展具有全球竞争力的资讯通信产业；

（3）培养具有全球竞争力的信息化专门人才；

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS IND

（4）利用信息通信技术提升数字媒体与娱乐、教育培训、金融服务、旅游零售和电子政府等 9 大经济领域的发展水平。

在电子政府、感知城市及互联互通方面，新加坡的成绩引人注目。新加坡的电子政府公共服务架构已经可以提供超过 800 项政府服务。无线新加坡项目目前已在全国拥有 7500 个热点，相当于每平方公里就有 10 个公共热点。Wi-Fi 热点的进一步拓展与增设，为新加坡国民提供了真正意义上的全方位无线网络。

電子工業出版社 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY